

Guy BÉDIOT

La traversée de la pluie et l'hydro climatologie

Souvenirs discursifs



Guy BÉDIOT

**LA TRAVERSÉE
DE LA PLUIE ET L'HYDRO
CLIMATOLOGIE**

Souvenirs discursifs



CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Les Agences de l'Eau, Jean Loïc Nicolazo, 1997
Le Lexique six Langues de l'Eau, collectif, 2001
Abécédaire de l'agronomie Champenoise, Jean-Louis-Pascal Ballif, 1997
Dynamique de l'eau et irrigation en Champagne, Jean-Louis-Pascal Ballif, 1998
Ruissellement et érosion en Champagne, Jean-Louis-Pascal Ballif, 1999
La nature juridique de l'eau, Arnaud Gaonac'h, 1999
Technologies Propres et Sobres, Michel Maes, 1996
La responsabilité pénale des élus locaux, Sophie Canadas-Blanc 1998
Planète Eau : repères pour demain, Jean-Luc Redaud, 2000
L'eau, ressource vitale, Jean-Louis-Pascal Ballif, 2001
Histoire illustrée de 5 000 ans d'hygiène publique, Maurice Paquier, 2001
L'industrie des carrières et le développement durable, collectif, 2002
Histoires d'eaux parisiennes, Maurice Paquier, 2004
Plages en Ville, baignades en Marne, Thomas Deschamps, 2004
L'eau en France : quelle stratégie pour demain ?, Jacques Oudin, 2004
La guerre de l'eau aura-t-elle lieu ?, Nguyen Tien-Duc, 2004
Les eaux pluviales, James Chéron, Alix Puzenat, 2004
L'eau potable et l'assainissement, Jean-Luc Martin-Lagardette, 2004
Environnement et politiques locales, un nouveau défi ? Régis Morvan, 2006
Les cours d'eau et le droit, Philippe Marc, 2006
Un nouveau rôle pour les agences de l'eau ?, Bernard Kaczmarek, 2006
Les agences de l'eau : quarante ans de politique de l'eau, Jean-Loïc Nicolazo, Jean-Luc Redaud, 2007
L'eau dans son environnement rural, Jacques Bordet, 2007
L'eau... Une histoire peu ordinaire, Raoul Caruba, 2008
Le renouveau du droit public fluvial, Guy Arzul, 2008
La prise en charge des dettes d'eau des usagers démunis en France, Henri Smets, 2008
Le vademecum de l'eau, Jean-Luc Martin-Lagardette, 2009
De l'eau potable à un prix abordable, Henri Smets, 2009
Les principes du droit et de l'administration des Eaux, Dante A. Caponera, 2010
L'accès à l'assainissement, un droit fondamental, Henri Smets, 2010
Le droit à l'eau : une urgence humanitaire, Bernard Drobenko, 2010
La mise en œuvre du droit à l'eau : les solutions à Paris, Henri Smets, 2011
Le Conseil Mondial de l'Eau, René Coulomb, 2011
Théorie et pratique du droit de l'eau, Alan Saout, 2011
La tarification progressive de l'eau potable, Henri Smets, 2011
Dérèglement climatique et ressources en eau, Nguyen Tien-Duc, 2012
Le droit à l'eau potable et à l'assainissement en Europe, Henri Smets, 2012
Le droit à l'eau : une urgence humanitaire 2ème édition, Bernard Drobenko, 2012
La protection juridique des cours d'eau, Aude Farinetti, 2012
La part fixe dans la tarification de l'eau des ménages, Henri Smets 2012
Les nouveaux tarifs de l'eau potable, Henri Smets 2013
La recherche des fuites d'eau, Alex Gaspar, 2013
Le code de l'eau, 3^{ème} édition, Bernard Drobenko, Jacques Sironneau, 2013
Les sources du droit à l'eau en droit international, Marie-Catherine Petersmann, 2013
Territoires, villes et campagnes face à l'étalement urbain et au changement climatique, collectif, 2013
L'eau, entre réglementation et marché, sous la coordination de Max Falque, 2014
Le filtre planté de roseaux, collectif, 2014
Introduction au droit de l'eau, Bernard Drobenko, 2014
L'accès à l'eau, un nouveau droit de l'Homme ? Franck Duhautoy, 2014

Périodiques

L'eau, L'industrie, les Nuisances (mensuel)
Le Guide de l'Eau, collectif

ISBN : 979-10-910089-16-6

Copyright Éditions Johanet 2014, Paris

Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage (Loi du 11 mars 1957) sans l'autorisation de l'éditeur ou du centre Français d'exploitation du droit de copie.

Prologue

De la mesure avant toute chose

Disons d'emblée que tous ces souvenirs n'auraient pu exister sans la création en 1961 du 3^{ème} cycle de géomorphologie dynamique à Besançon par Gabriel Rougerie puis l'organisation de mon départ en stage en Tunisie au sein d'une équipe multidisciplinaire – en 1963 déjà ! – où j'ai appris à travailler en dehors de l'université sur le ruissellement et l'érosion des sols. J'avais tellement pris goût à me colleter avec un monde d'étude et de recherche fait uniquement d'ingénieurs que j'ai décliné ma nomination au CNRS en 1967, ce qui a pu faire de la peine à mon vénéré professeur : c'était sans doute le fruit de sa pratique fondée sur une grande liberté de pensée et d'action laissée à ses élèves, en dehors du fait qu'il m'avait inoculé sans le savoir le virus du mesurage et de quelques uns des raisonnements tournant autour de ses résultats. On ne se débarrasse pas de ce virus, surtout si tout au long de sa vie on rencontre de nouveaux porteurs : je n'en fais pas la liste, elle est trop longue et il serait fâcheux d'omettre un nom.

En m'inscrivant à l'association NSS (Natures, Sciences et Sociétés) en 1997, j'avais envie de renouer un jour avec mes vieux démons de libre chercheur en hydro-climatologie, mis en sommeil une bonne dizaine d'années auparavant. Pourtant, depuis 1986, date à laquelle j'avais quitté l'hydro climatologie pour me consacrer entièrement au projet national de banque de données sur l'eau jusqu'en 1993, ensuite au schéma directeur du système d'information et de communication de mon employeur, l'agence de l'eau Seine-Normandie¹, puis à divers bouche-trou, j'avais déjà réagi à la pensée devenant unique sur le

1. Ce fut l'un de mes plus grands échecs professionnels.

changement climatique. Avec Jean-Marie Masson², nous avons publié un article dans *La Houille Blanche* sur « *pourquoi pleut-il davantage le second semestre en hémisphère nord et inversement dans l'hémisphère sud ?* ». C'était une intuition qui m'était venue alors que j'étudiais les premiers résultats du réseau pluviométrique complémentaire juste avant les fêtes de fin d'année 1972. Je rendis plusieurs visites à la bibliothèque de la Météorologie nationale pour recopier les moyennes pluviométriques mensuelles publiées à travers le monde entier. Et je consacrai une partie de mes vacances d'août 1976 à faire³ sans calculatrice, pour chaque station, les additions par semestre puis à faire les soustractions entre le total du deuxième semestre et le total du premier semestre sur l'hémisphère nord et inversement pour l'hémisphère sud. Ensuite, je reportai les résultats sur une carte du globe, et traçai les isohyètes résiduelles sur les terres émergées. Les choses en restèrent là jusqu'à la fin des années 1980. Tout le tintamarre autour de la préparation de la conférence de Rio nous incita à publier. Jean-Marie Masson s'occupa de la partie variation du stock d'eau dans l'atmosphère et nous proposâmes l'article à *La Houille Blanche*. Joseph Jacquet⁴, membre du comité de rédaction, me demanda de le faire parvenir à Robert Kandel pour information. Je ne le fis pas : pour moi j'avais fait l'essentiel, à savoir me vider la tête de cette affaire. Je ne reçus guère que 2 ou 3 réactions de ceux auxquels j'avais fait parvenir un tiré à part. J'avais encore oublié Robert Kandel, qui ne devait pas être un lecteur de *La Houille Blanche*, revue quasi confidentielle mais bien connue des hydrauliciens en France et à l'étranger. Notre article ne pouvait pas toucher les chercheurs sur le climat, d'autant plus que nous n'étions pas identifiés comme étant inscrits à cette discipline.

Je fis part de cette adhésion à NSS à mon directeur général, Pierre Frédéric Ténière-Buchot (PFTB pour faire plus court). Ce dernier me mit en garde : « ne crois pas que ton retour à l'un de tes dadas sera bien perçu par les gens en place : tu sera honni et, plus grave, tu deviendras aigri ». PFTB, qui défendait trop bien le système financier des agences de l'eau que certains élus Verts qualifiaient de « coopératives de pollueurs », fut congédié par la ministre Voynet et remplacé par Pierre-Alain Roche qui, du temps où il était jeune ingénieur des Ponts en

2. Du laboratoire d'hydrologie mathématique de l'Université de Montpellier.

3. Je sortais assez largement du cadre du bassin Seine-Normandie !

4. Il dirigeait le service « échanges atmosphériques » d'études et recherches EDF à Chatou.

Prologue

poste au BRGM, m'avait apporté, 2 décennies plus tôt, une aide précieuse dans la conduite des études sur l'amélioration de la gestion des barrages-réservoirs.

J'eus connaissance d'un débat sur le changement climatique sur le site « médiaterre ». Je rédigeai une contribution en mars 2000⁵. Au cours du printemps 2000 je rencontrai Yves Lenoir, l'un des protagonistes, dans son bureau de l'école des Mines. Nous échangeâmes durant une heure. Au cours de la discussion je lui posai la question qui me brûlait les lèvres : « d'après mes dernières lectures qui remontent à plus de 15 ans, la question d'un réchauffement climatique n'était pas du tout à l'ordre du jour : à votre avis, quel est l'élément déclencheur de tout ce cirque ? ». La réponse de Lenoir me surprit beaucoup : d'après ce qu'il savait, c'est l'accident de la navette spatiale qui constituait le tournant décisif. Ce dernier était intervenu quelques mois après la conférence de Villach où il était admis que les émissions de gaz à effet de serre pouvaient être à l'origine d'un réchauffement climatique. La NASA, pour ne pas perdre la main dans la poursuite de son programme avait rapidement convaincu des scientifiques de venir faire un stage autour de ce thème, à l'issue duquel le journal allemand *Der Spiegel* faisait sa une avec un photo montage d'une cathédrale allemande (Francfort ou Cologne ?) à demi submergée par les eaux. Voilà ce qui nous guettait si nous ne faisons rien. Le battage médiatique qui s'ensuivit fut énorme. Ce que venait de me dire Lenoir me laissa pantois.

Pierre-Alain Roche connaissait mon passé d'hydro-climatologue. Vers la fin du printemps 2000, il me demanda un rapport sur le changement climatique et l'agence de l'eau Seine-Normandie. Pour faire ce rapport et me mettre à jour sur ces questions, j'avais la chance d'avoir lu l'article de Robert Kandel : « *Le Développement durable, l'atmosphère et le climat* » publié dans la revue *Natures Sciences et Sociétés*⁶. Fin août, je rendis mon rapport.

Sur le moment, l'article de Robert Kandel me donna réellement envie de replonger dans mes dadas d'une autre époque. Mais la diatribe sur une demi-page publiée ultérieurement⁷ dans NSS me fit réfléchir.

5. Il suffit de regarder la date de création de ce fichier sur mon ordinateur pour être aussi précis.

6. Volume 7, numéro 3 de 1999. Internet est vraiment pratique pour retrouver des références.

7. Volume 8, numéro 3 de 2000. Seule l'impression laissée m'est restée en mémoire, pas le texte. Mais vérifiez par vous-mêmes.

En effet, aucun argument scientifique n'était avancé. C'était en quelque sorte le rappel à l'ordre institutionnel : on ne devait pas émettre le moindre doute sur les conclusions du GIEC sous peine de Ce n'était pas écrit, mais la menace voilée m'a glacé. L'inquisition était de retour, sous une forme nouvelle. Comment la publication de ce texte avait-elle passé le barrage du comité de lecture ? Je rassemblai facilement les éléments du puzzle lorsque j'appris la nomination de son auteur à la tête du CNRS quelques semaines plus tard. En effet, l'association NSS et sa revue recevaient des subventions de l'organisme en question. La manne financière avant tout. Elémentaire, non ? Je repensai à ce que PFTB m'avait conseillé et à l'entrevue avec Yves Lenoir. J'ai alors reconsidéré la question et me suis fait à l'idée que la retraite pouvait être consacrée à beaucoup d'autres activités plutôt qu'affronter d'inutiles moulins à vent. Le GIEC m'avait d'abord fait penser aux côtés ludiques des « *call girls* » d'Arthur Koestler⁸, mais maintenant j'en redoutais le côté « pandémie religieuse ».

Très vite, mon épouse et moi avons pris la décision d'aller voir ailleurs. Une opportunité s'est offerte avec sa nomination à Nouméa. De mon côté, l'heure de la retraite avait sonné. Restait le devenir de mes archives. Je pensais en faire un feu de « joie ? ». Comme elles intéressaient Richard Laganier, elles ont échappé de peu au mauvais sort que je leur réservais. Peu avant mon départ, j'avais à effectuer deux dernières choses plus importantes à mes yeux que mes activités de bouche-trous. A la demande de Claude Thirriot, qui présidait le GFHN⁹, je devais une conférence invitée sur le concept de réseau de mesure qui eut lieu dans des locaux du CNRS à Meudon, grâce à l'hospitalité de Claude Cosandey. La seconde consista en un exposé sur l'Agence de l'eau Seine-Normandie devant la commission « eau » du Commissariat au Plan. Enfin il ne me restait plus qu'à démissionner du CNFSH¹⁰ et du jury du prix d'hydrologie Henri Milon de la Société Hydrotechnique de France.

Alors pourquoi ce revirement de ma part, onze ans plus tard ? A notre retour de Nouvelle Calédonie, nous avons acheté un téléviseur,

8. Le thème central de ce roman est la tenue d'un congrès scientifique avec les affinités et les inimitiés des participants dont la principale préoccupation commune est de fixer le lieu et la date du prochain.

9. Groupe Français d'Hydrométrie Neutronique.

10. Comité National Français des Sciences Hydrologiques.

chose que nous n'avions pas auparavant. Les documentaires sur ARTE ou sur France 5 relatifs à la vie animale ou végétale nous plaisaient beaucoup, mais chaque fois le charme était rompu *in fine* par les méfaits du réchauffement climatique responsable du blanchiment des coraux, de la probable disparition d'espèces fort sympathiques et de bien d'autres choses. A la longue, cela finit par agacer. Le premier déclic fut la fête organisée par les fils Rougerie à l'occasion des 90 ans de leur père, Gabriel, notre professeur de géographie à l'Université. J'eus l'immense plaisir de retrouver mes anciens camarades de Besançon et ceux des générations suivantes à la Sorbonne. Tout le monde était heureux. Trois semaines plus tard Gabriel Rougerie mourut. Yves Monnier suggéra d'offrir un hommage posthume. J'évitai la question du climat en proposant un texte sur la propagation d'un débit ajouté à l'étiage. J'avais remis le pied à l'étrier et l'agacement répété par les interventions radio-télévisées des tenants du réchauffement a entretenu mon envie d'en dire plus. Le second déclic fut la réception d'un courriel émanant d'un géographe à la retraite. Vous trouverez ma réponse dans le texte placé en troisième partie sorte d'épilogue pour nos gouvernants : « le changement climatique encore et toujours » que je fis lire à trois amis fort éloignés de ces préoccupations. Ils se montrèrent intéressés au point de m'inciter à le publier. A la réflexion, je ne pouvais pas le publier sans mettre de l'ordre dans mes souvenirs sur la pluie et certains aspects de l'hydrologie. La parution récente du livre de Stéphane Hessel, *Indignez – Vous*, m'a insufflé l'obligation morale de passer à l'acte.

Je croyais avoir légué mes archives en totalité à Richard Laganier, y compris ma thèse, – c'est dire ma volonté de couper avec toute une période de ma vie –. Il se trouve que j'ai découvert récemment deux documents échappés du legs : le premier est une photocopie d'un article de 1850¹¹ de Ch. Martins « *des climats de la France et de leur influence sur son agriculture et le génie de ses habitants* » ; le second est un preprint de Vit Klemes pour la revue *Water Resources Research* en 1986 « *Dilettantism in Hydrology – Transition or Destiny ?* ». L'éparpillement de documents lors de déménagements successifs est-il la seule explication ? Ou bien faut-il envisager le simple résultat d'un acte manqué ? Tout ce qui suit a été écrit sans autres documents dans le domaine de l'hydro-climatologie : c'est une sorte de défi qui peut avoir ses revers en terme d'inexactitudes. La mémoire fait toujours des

11. Dans l'Annuaire Météorologique de la France.

siennes. Que le lecteur veuille bien me pardonner à l'avance. Quelques recours à internet ont été nécessaires, juste pour préciser un souvenir ou une remarque. Je me propose surtout d'envisager les précipitations atmosphériques du seul point de vue de leur observation au ras des terres émergées, soit le tiers de la surface du globe, avec une zone de prédilection, celle du bassin Seine-Normandie où j'ai passé l'essentiel de ma vie active. Sans reléguer aux oubliettes d'autres endroits où je suis resté quelques années, la Tunisie à mes tous débuts d'activité, Nouméa et la Bretagne pour la retraite. Ni la Franche-Comté où j'ai vécu mes 23 premières années.

Je terminerai par une citation extraite d'un livre récemment paru sur un tout autre sujet :

« Il faut se garder d'être victime de la propagande de ceux qui décrètent la vérité du moment, si souvent martelée qu'elle semble aller de soi.

L'esprit du temps se modifie. »

Gérard Chalian « *La Pointe du couteau, Mémoires tome 1* » chez Robert Laffont, page 453.

Avertissement

Au cours de la rédaction de cet ouvrage, deux courtes phrases n'ont cessé de m'habiter. Celle de Jacques Brel, « la pluie est traversière » et celle attribuée communément à Karl Marx, « les faits sont têtus ».

Or ces derniers sont tous partiels et deviennent partiels sous nos regards : c'est la principale difficulté de mon entreprise.

Première partie

**DE LA STABILITÉ
DES TOTAUX ANNUELS
DE PRÉCIPITATIONS
RECUEILLIES AU RAS DU GLOBE**

Chapitre premier

Les débuts en hydro climatologie

D'abord une digression sur mes premiers pas dans les sciences hydrologiques. J'arrivai le 18 février 1963 à Tunis en tant que stagiaire pour réaliser une thèse de 3^{ème} cycle de géomorphologie dynamique, au centre d'expérimentation et de recherche du génie rural (CERGR), mission confiée à la SCET COOP et dirigée par Yves Cormary, ingénieur agronome détaché d'EDF études et recherches de Chatou. L'étudiant universitaire en géographie de Besançon débarquait au beau milieu d'ingénieurs agricoles, tels André Lobert et Jean Marie Masson, ou hydraulicien tel l'italien Lucido. J'étais venu pour faire des travaux sur l'érosion des sols. Masson travaillait déjà sur l'équation universelle de pertes de terres que Wishmeier venait de publier un an plus tôt aux Etats-Unis. Il était en train de terminer la mise au point de la station mobile d'étude de l'érodibilité des sols, un simulateur de pluie conçu, fabriqué au CERGR et embarqué sur un camion citerne pour faire des essais sur une grande variété de complexes « sol – végétation » dénichés dans un vaste rayon autour de Tunis. Avec le recul, je suis encore étonné de la richesse de la documentation américaine à notre disposition : il y avait le « *Geological Survey* », les « *Transactions of ASAE*¹² », des rapports détaillés sous de nombreux angles de vue sur l'envasement du lac Mead en dérivation du Colorado et des fascicules édités par le laboratoire de l'armée américaine de San Anthony Falls à Minnéapolis. Très rapidement je m'aperçu que ces organismes s'ignoraient : c'était un bonheur pour nous autres.

Le travail que me confia Cormary consistait à adapter une méthode de calcul de la lame d'eau écoulée que les ingénieurs chercheurs du Soil

12. American Society of Agricultural Engineers.

Conservation Service du ministère américain de l'agriculture (USDA) avaient mis au point : encore un autre organisme à ajouter à la liste précédente. Les 3 bassins versants expérimentaux implantés au Djouggar sur le versant nord de la Dorsale tunisienne servirent de zones tests. Je rendis mon rapport courant octobre, pensant qu'il pouvait très bien faire l'affaire pour ma soutenance de thèse. A l'époque ce modèle du SCS ne calculait que la lame d'eau écoulée. Il fallait ensuite transformer par nos propres moyens cette lame d'eau en courbe des débits en fonction du temps, travail que réalisa Lucido, sur la base de tous les acquis des hydrauliciens italiens qu'il connaissait parfaitement. C'était le problème du « temps de concentration » que Cormary considérait être l'un des deux problèmes fondamentaux de l'hydrologie, le premier étant la détermination du « coefficient de ruissellement » c'est-à-dire l'objet de l'étude que je venais de réaliser. En consultant Internet récemment, je me suis rendu compte que ce modèle¹³ du SCS avait été complété et que la première partie, celle que j'avais appliquée en 1963, était restée inchangée, exceptés les références qui ne remontent qu'aux années 1986, l'application à l'hydrologie urbaine sur petits bassins versants imperméabilisés et les logiciels correspondants. L'ensemble sert encore régulièrement à des études aux Etats-Unis, sur des bassins ruraux et aussi en hydrologie urbaine pour calculer les volumes écoulés et les débits de pointe, deux résultats indispensables pour dimensionner les ouvrages. La plus grande difficulté rencontrée lors de l'application, hormis les recherches sur le terrain pour qualifier les complexes sol végétation, a été la conversion manuelle dans notre système métrique des unités américaines. C'est dire... . Aujourd'hui je me rends compte que tous ces calculs inspirés par le modèle fort pragmatique de l'USDA reposaient sur le seul et unique poste pluviométrique installé près des parcelles expérimentales d'étude du ruissellement et de l'érosion, dont les bassins versants expérimentaux étaient distants de plusieurs kilomètres à vol d'oiseau dans 3 directions distinctes. Nous verrons plus loin ce qui faisait que les résultats obtenus ne pouvaient pas être probants, du seul point de vue de la connaissance de l'entrée du système, à savoir la lame d'eau précipitée.

Lorsque ce rapport fut édité, je constatai que Cormary avait ajouté son nom au mien : adieu l'idée de la soutenance. Nous avions l'habitude d'aller à la chasse à plusieurs, le samedi matin. Je n'avais pas de

13. L'expression clé identifiant la méthode est « runoff curve number » associée à SCS et USDA.

fusil et je jouais le rôle de rabatteur. Une fois seul avec lui, je fis comprendre à Cormary le problème auquel j'étais confronté. Je ne sais pas comment il se débrouilla : début décembre, je venais de recevoir un télégramme de mes parents disant que l'armée avait envoyé ma feuille de route pour une incorporation à Colmar et 10 jours plus tard j'en recevais un autre indiquant que le sursis d'incorporation m'était accordé. J'avais déjà largué ce que je ne pouvais pas emporter et entamé une série de rencontres festives avec mes copains. C'était reparti pour une nouvelle année, au cours de laquelle, outre les travaux qui m'étaient demandés, j'ai réuni un amas d'observations, de résultats d'analyses que j'effectuais moi-même au labo, et de sources bibliographiques qui me servirent à rédiger ma thèse une fois rentré en France. Je n'en ai jamais fait grief à Cormary. Au contraire je lui suis reconnaissant de m'avoir obligé, sans aucune méchanceté de sa part, à redoubler d'efforts et d'avoir pu continuer à vivre encore 20 mois de travaux fructueusement formateurs en Tunisie au milieu de cette équipe transdisciplinaire, sans Cormary qui entre temps avait dû regagner la France à la fin de son détachement pour être plongé dans le contexte des débats de la nouvelle loi sur l'eau et de son application.

Au début des années 60, les problèmes de l'accroissement de la pollution des rivières et par la suite, ceux de l'accès à une ressource en eau suffisante et de qualité se posèrent avec acuité. Le mécontentement a mobilisé fortement deux catégories aux intérêts apparemment opposés : d'un côté les associations de pêcheurs à la ligne dont le nombre d'adhérents avoisinait alors plusieurs millions et de l'autre les industriels installés à l'aval de cours d'eau fortement pollués par les usages amont. Le Parlement s'est saisi de l'affaire et après un long débat a voté à une très large majorité, la loi sur l'eau du 16 décembre 1964. Toute la population était consciente du problème : il suffisait de voir dans les journaux les photos des mousses submergeant les barrages de la navigation de la Seine sur quelques décimètres jusqu'à parfois 2 mètres de haut. On comprenait immédiatement qu'il fallait agir. Cette loi de 1964 redéfinissait le rôle de l'Etat dans le domaine de la police des eaux, mais surtout introduisait 2 grandes innovations :

- d'une part la possibilité offerte aux collectivités locales de se déclarer maître d'ouvrage en matière d'ouvrages d'alimentation en eau et d'assainissement (auparavant ce rôle était dévolu à l'Etat) ;

- d'autre part la création d'agences financières de bassin, chargées de percevoir des redevances sur les prélèvements et les rejets d'eaux usées pour aider aux financements des ouvrages jugés nécessaires. Le terme « bassin » conduisait à la création d'entités géographiques suivant les contours de grands bassins hydrographiques pour y réaliser l'aménagement de l'eau. Ce qui a fait dire que cette loi est la première loi de décentralisation connue en France.

Un jour de décembre 1964, je rendis visite à Yves Cormary, qui dirigeait un bureau du SPEPE¹⁴ dont le responsable, Yvan Chéret, avait participé activement à l'élaboration du texte de loi qui venait être adoptée le 16 décembre. Au cours de cette visite, j'ai été mis en contact avec l'équipe chargée de rédiger le décret d'application concernant les agences financières de bassin, au moment où il s'agissait d'en fixer le nombre et les contours. Dans cette équipe, il y avait un hydrologue de l'ORSTOM, Claude Auvray, qui m'a fait ce commentaire surprenant : « au bout de trois mois, nous venons seulement de comprendre que 7 n'est pas divisible par 3 ». Devant mon étonnement, il me précisa que les considérations hydrologiques étaient certes importantes, mais qu'il fallait composer avec la « réalité de terrain », à savoir qu'il existait 3 corps techniques de l'Etat qui avaient des compétences en matière d'eau : les Mines, les Ponts et Chaussées et le Génie Rural. Dans leur sagesse, les hydrologues, dont Claude Auvray, avaient séparé le bassin du Rhône des fleuves côtiers de la Méditerranée (Corse comprise) à cause de leur régime particulier, ce qui portait à 7 le nombre d'agences financières de bassin. Mais comme il fallait partager équitablement le futur gâteau, le nombre de 6 agences était le seul qui permettait d'attribuer 2 directions d'agences à chacun des corps et fut obtenu en assemblant le Rhône avec les côtiers méditerranéens, à charge des futurs directeurs de constituer chacun les 3 divisions pour satisfaire les 3 corps. Ce que j'appelais le Yalt'eau¹⁵ ! Sauf que dans la réalité, il y avait une hiérarchie : aucun ingénieur des mines ne voulait être sous les ordres d'un ingénieur des ponts et chaussées ou du génie rural.

Cette anecdote est instructive à plus d'un titre. Je n'en retiendrai qu'un, celui bien connu de la réalité du corporatisme et des corps de fonctionnaires – au-delà de toute association, secrète ou non – qui

14. Secrétariat permanent d'études des problèmes de l'eau

15. En référence à la conférence de Yalta où Roosevelt, Staline et Churchill s'étaient partagés le monde.

entrent de plain pied comme acteurs influents au sein de l'Etat. Toute réflexion sur la démocratie doit se faire avec cette réalité : l'ignorer, ou pire, l'interdire serait une erreur. De 1988 à 2000, je fus régulièrement convié à la réunion mensuelle des directeurs d'agence avec le directeur de l'eau assurant la tutelle du ministère de l'environnement sur les agences, à l'occasion des études de conception des banques de données sur l'eau que j'ai animées durant 5 ans, puis du suivi de leur réalisation. Et là je me suis rendu compte que les points de vue sur ces problèmes particuliers, mais aussi sur d'autres parce que j'assistais assez souvent à toute la réunion, étaient marqués du sceau de leur formation et de leur personnalité. Aujourd'hui, j'en conclus qu'il est impératif que tous les directeurs ne dépendent pas d'un même corps, car si c'était le cas ce serait purement et simplement les orientations définies par le conseil général du corps en question qui prévaudraient sans débat au fond. Donc, je fais amende honorable sur mon attitude d'antan qui consistait à me gausser de l'organisation précitée. Surtout dans des domaines aussi complexes que l'eau et l'environnement en général.

La création des 6 missions déléguées de bassin¹⁶ fin 1965 avait pour but de préparer le terrain à l'application de la nouvelle loi sur l'eau du 16 décembre 1964 et à l'entrée en lice des agences financières de bassin pour améliorer les ressources en eau existantes et lutter contre la pollution. Au niveau national, il existait un secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau qui guidait la mise en place du nouveau système. L'idée première des secrétaires des missions déléguées, futurs directeurs d'agence de bassin, était de faire le point de ce que l'on pouvait savoir sur l'eau dans leur bassin avant de se lancer dans l'action. Ce fut une décision de bon sens. Pour faire ce travail, ils recrutèrent avec réticence des contractuels – les fonctionnaires n'étaient pas pressés de poser leur candidature¹⁷ – ou des travailleurs indépendants payés sur

16. Adour-Garonne ; Artois-Picardie ; Loire-Bretagne ; Rhin-Meuse ; Rhône-Méditerranée-Corse ; Seine-Normandie.

17. Les seuls pouvant manifester un intérêt à ces questions étaient ceux des ponts et chaussées, du génie rural et des mines, au sein de leurs corps d'ingénieurs, d'ingénieurs des travaux et de techniciens. A l'époque, en 1965, tous ces corps étaient mobilisés sur le terrain par les transformations de l'agriculture (mécanisation, remembrement, drainage, irrigation), par l'urbanisation (bâtiments, routes et autoroutes, eau potable et assainissement) et par la mutation mondiale des problèmes miniers et énergétiques. Ce n'est plus tout à fait le cas aujourd'hui : tout ce monde d'ingénieurs et techniciens fonctionnaires percevant une prime en fonction du volume des travaux supervisés se rabat faute de mieux sur le développement durable et l'écologie. Les grands projets se font rares et nécessitent moins de fonctionnaires compétents du fait d'une systématisation de la délégation au privé.

honoraires pour un travail bien déterminé : une fois le travail effectué, il n'avaient pas d'obligation de les salarier. Pour faire ces études de mise à niveau des connaissances sur le terrain, ils se sont tournés vers certains universitaires. A Seine-Normandie se sont retrouvés en 1966 des étudiants en 3^{ème} cycle d'hydrogéologie du professeur Glangeaud, pour rédiger des monographies sur les affluents de la Seine et les cours d'eau normands¹⁸. A côté, il y avait des recrutements d'ingénieurs dont la plupart avaient exercé sur le continent africain, principalement au Maghreb. Ces ingénieurs recrutés et mis à disposition dans un premier temps par une société de service allaient mettre en œuvre la machinerie de l'agence, c'est-à-dire percevoir des redevances sur les prélèvements d'eau et sur les rejets puis avec le montant des sommes perçues, participer au financement des équipements destinés à améliorer l'accès à la ressource et à épurer les eaux usées. C'était fondamentalement de l'aménagement du territoire : c'est pourquoi les agences furent rattachées à la DATAR.

Mon recrutement s'est opéré d'une manière à la fois différente, compte tenu de mon origine universitaire, et semblable comparée à celui des ingénieurs. J'avais passé près de 3 ans en Tunisie dans un organisme financé par la Caisse des dépôts et consignation¹⁹ pour y préparer une thèse de géomorphologie dynamique sur l'érosion des sols due au ruissellement que j'allais soutenir en juin 1966 à Besançon avec un jury très diversifié pour l'époque : mon directeur de thèse Gabriel Rougerie avait fait appel à Jean Tricart, professeur de Géographie à l'université de Strasbourg, à Maurice Dreyfus professeur de géologie à la faculté des sciences de Besançon et à Joseph Jacquet responsable de la division « hydrométéorologie » à études et recherches d'EDF Chatou. C'est ce dernier qui m'avait procuré auparavant un stage post scolaire de 6 mois à Bort-les-Orgues, à la demande mon ancien patron en Tunisie, Yves Cormary, afin que je mette en place une structure d'étude des résultats acquis sur le terrain par les équipes de jaugeage des cours d'eau affluents du bassin amont de la Dordogne mais aussi pour que je puisse rédiger ma thèse. François Valiron, secrétaire de la mission déléguée de bassin Seine-Normandie, puis directeur de l'agence à sa création

18. Ce sont : Xavier Baraduc, Alain Cadiou, Hervé Manéglier et Claude Salvetti.

19. Le CERGR, centre d'études et de recherches du génie rural, chargé des problèmes de l'irrigation et de la conservation des eaux et du sol. C'est une mission qui fut de courte durée pour s'achever fin 1966, du moins en ce qui concerne la participation des coopérants français que j'y avais côtoyés.

le 1^{er} janvier 1967, connaissait bien le contexte et certains des acteurs cités : il m'engagea sans barguigner fin mai 1966 pour faire les études climatologiques du bassin Seine-Normandie.

A l'époque, je pensais que la climatologie consistait à étudier les observations de terrain pour en tirer profit, avec une optique orientée vers la connaissance pour l'action. Je n'avais qu'une toute petite idée de la consistance des données climatiques à travers les observations de pluie effectuées sur le versant nord de la Dorsale tunisienne, et le dépouillement des enregistrements du pluviographe de Sidi-bou-Baker qu'avait mené Jean-Marie Masson pour établir l'index d'agressivité des pluies de Wishmeier. Du moins je savais que, dès qu'il existait des données, celles-là étaient promises à la trituration pour en extraire des éléments utiles, comme avec les indices dans les romans policiers. Je ne crois pas avoir fondamentalement changé depuis lors. Parmi les géographes français, Pierre Pédelaborde, connu pour sa thèse sur le climat du Bassin parisien, était considéré comme le promoteur de la climatologie dynamique. Ce n'était pas ma voie. Je m'aperçus très vite qu'il y avait de très nombreuses autres finalités d'études en climatologie, en particulier tout ce que faisaient EDF, le CEA, l'INRA, les services de protection des végétaux, mais qu'il était difficile de pénétrer dans la plupart de ces organismes pourtant financés sur fonds publics : on m'a souvent rétorqué ou fait comprendre que l'information c'était le pouvoir et que ça ne se partageait pas. Je ne pense pas que cette attitude ait beaucoup changé de nos jours puisqu'on en est arrivé à faire payer ces informations que le contribuable (ou pour faire plus libéral : le client) a déjà financées. Si bien qu'on a accumulé des monceaux de données que plus personne n'a réellement les moyens ni l'envie d'utiliser : le pouvoir n'a jamais été dans la détention d'information – n'importe quel agent plus ou moins secret peut la subtiliser –, mais dans l'aptitude à son utilisation. C'est aussi à partir de cette époque que je m'habituai à voir qu'un même lot de données pouvait être traité de différentes façons pour satisfaire à des finalités très diverses : sur le coup, je l'observai sans trop en entrevoir toutes les implications, à savoir l'organisation des dites données pour en faciliter la réutilisation. J'ai toujours eu l'esprit de l'escalier et, avec l'âge, les marches paraissent de plus en plus hautes et délicates à gravir.

Autrement dit, à l'été 1966 je débarquais dans un autre univers. Et ce n'était pas pour me déplaire, ayant eu l'impression que sur le domaine

de l'érosion des sols, j'avais bénéficié de beaucoup de chances : j'avais pour ainsi dire fait un tour de la question et je ne voyais pas en quoi je pourrais apporter quelque chose de nouveau, sinon à la marge, et me répéter sempiternellement sur le sujet n'était pas du tout de mon goût. C'est dès cette époque que j'ai compris qu'il fallait que ma curiosité soit bien sollicitée pour que je me lance facilement dans autre chose. Et puis il y avait les conditions matérielles : depuis mon séjour en Tunisie, étant d'une famille pauvre, j'avais compris qu'il me fallait simplement gagner légèrement plus d'argent que je n'en avais besoin pour ne pas me préoccuper de cet aspect des choses, pour que ça ne me prenne pas la tête. L'offre de Valiron tombait à point : j'avais un nouveau sujet d'étude et les moyens de vivre.

Chapitre 2

La cartographie des précipitations annuelles

Je devais commencer mon travail par l'établissement d'une carte pluviométrique de référence pour le bassin. C'est une façon d'aborder la variabilité spatiale des précipitations sur une zone délimitée à l'avance, sachant que, comme l'indique le titre d'un film, il pleut toujours là où c'est mouillé. En effet, quelle que soit la période étudiée, les maxima et minima pluviométriques conservent leurs emplacements, à savoir Dreux pour le minimum et le Haut Follin pour le maximum. Vues de loin, ces cartes ont toutes la même allure. Très vite je me rendis compte de la pauvreté de l'information. Tout au plus 450 points de mesure concernant la superficie du bassin Seine-Normandie, soit plus de 90 000 km². Par comparaison, la densité de postes utilisables à l'époque en Angleterre dont la configuration rappelle celle du bassin parisien, était plus du double. Un fascicule « normales 1931-1960 » de la Météorologie nationale venait de paraître et rassemblait les tableaux des pluviométries annuelles et mensuelles pour toute la France : ce fut le document de base de mon travail. En compulsant les différents bouquins de climatologie et d'hydrologie à ma disposition, je ne trouvai aucune méthode satisfaisante pour étendre l'information de 450 points de mesure à l'ensemble des points du bassin. La fameuse méthode des polygones de Thyssen très généralement citée me semblait complètement déconnectée de la réalité du phénomène, parce qu'elle se moque de tout ce qui se trouve entre les points d'observation, en particulier le relief, son orientation et son importance. En outre, elle était d'une mise en œuvre très longue et fastidieuse : il suffisait d'une lacune dans la chronique d'une station pour reconsidérer entièrement la configuration géométrique du découpage de l'aire d'influence de chaque station. Aujourd'hui ce travail pourrait être facilement automatisé, mais cela ne gommerait pas le premier inconvénient cité.

Pour bien comprendre le problème posé par l'utilisation des polygones de Thiessen, prenons le cas caricatural du tracé de la zone d'influence du pluviomètre de Grenoble situé au centre d'un réseau composé des pluviomètres de Lyon, Chambéry, Turin, Gap et Valence (sur le Rhône à l'aval du confluent avec l'Isère). Le polygone correspondant est obtenu en traçant les médiatrices suivantes :

- entre Grenoble et Chambéry,
- entre Grenoble et Lyon,
- entre Grenoble et Valence,
- entre Grenoble et Gap,
- entre Grenoble et Turin.

La pluviométrie mesurée à Grenoble serait censée être la même pour les Alpes en direction de Turin et Gap, pour le Vercors en direction de Valence et de Lyon, et pour le massif de la Chartreuse et le Grésivaudan en direction de Lyon et de Chambéry : c'est totalement absurde. A moins de placer les pluviomètres sur des pics pluviométriques, ce qui est très peu possible en France parce que les stations sont situées dans les chefs lieux de cantons eux-mêmes sur des voies de communication, il s'ensuit une sous estimation systématique de plusieurs dizaines voire centaines de millimètres. Et un déni de la réalité du phénomène pluvieux !

Si la pluie croissait avec l'altitude, comme j'en avais eu quelques indices au cours de mes lectures des bons auteurs, je pourrais peut-être utiliser toute l'information fournie par la Météorologie nationale sur 450 postes²⁰ et l'étendre à l'ensemble des points du bassin. J'avais à ma disposition un fond de carte au 1/500 000^{ème} et une carte en couleur d'isohypses avec un espacement de 50 m puis de 100 m au dessus de 500 m, établie et éditée par le BRGM pour le compte de la mission déléguée Seine-Normandie. Je cartographiai chaque point de mesure d'après ses coordonnées Lambert, notai son altitude et sa moyenne pluviométrique annuelle 1931-1960. Par tâtonnement, je mis les postes en contact les uns avec les autres sur une feuille de papier millimétré, avec en ordonnées la moyenne pluviométrique et en abscisse l'altitude. Puis je délimitai sur la carte chaque zone où il se dégageait une

20. L'altitude et les coordonnées Lambert de chaque station étaient connues.

relation linéaire entre la pluie et l'altitude, le fameux « gradient pluviométrique ». Entre temps, ma recherche bibliographique m'avait conduit à entrer en contact avec des chercheurs étrangers, notamment un israélien, Rosenberg, qui avait conforté mon hypothèse. J'avais aussi le souvenir que Bénévent situait « l'optimum pluviométrique » dans les Alpes françaises vers 2000 mètres d'altitude. Le choix du terme « optimum » m'a toujours intrigué. Pourquoi pas « maximum », avais-je songé ? Je n'ai jamais su répondre à cette question. Peut-être que Bénévent voulait traduire le fait que l'altitude des masses nuageuses impliquait une répartition des totaux pluviométriques autour d'une altitude du relief, en l'occurrence celle estimée à 2000 m.

Sur Seine-Normandie, l'altitude moyenne n'est que de 150 m. Pour invoquer son influence, le raisonnement simpliste était le suivant. La masse nuageuse se soulève en passant sur le relief et les courants ascendants accélèrent la condensation de la vapeur d'eau, la formation de gouttelettes et la chute des précipitations. Les versants face au vent pluvieux reçoivent plus que ceux sous le vent. La vérification est effectuée avec les cartes de gradient. A une époque antérieure à mon travail, il y avait eu une polémique au sujet de l'influence des forêts sur l'augmentation des précipitations : il me semblait évident qu'une zone peuplée d'arbres culminant à 50 m avait toutes les chances de recevoir plus de précipitations que la même zone coupée à blanc. Encore fallait-il se procurer les moyens de le prouver, ce qui n'était pas l'objet de mon travail. Bref, je me lançai dans cette cartographie sur une table lumineuse superposant la carte du relief, la carte où se situaient les points de mesures avec leurs « normales 31-60 » et la carte à établir, avec à côté mes graphiques de gradient. Le jeu consistait à filer l'isohyète²¹ le long de l'isohypse, jusqu'à ce que tout le bassin soit couvert et que le résultat final paraisse pertinent. C'est-à-dire qu'on ne se retrouve pas emmêlé dans les isohyètes, telle une mouche dans une toile d'araignée. Le reste était affaire de dessinateur professionnel et d'édition. A l'époque, je m'interrogeais souvent sur cette nécessité de considérer les précipitations comme un phénomène sans discontinuité dans l'espace, justifiant ainsi sa représentation cartographique sous forme d'isohyètes : ne retrouvait-on pas le problème de la courbe de niveau censée traduire aussi les trous, les à pic et les surplombs ? Autrement dit, l'éventualité

21. Courbe d'égales valeurs de précipitations ; l'isohypse est la courbe de niveau.

d'avoir affaire à un gouffre ou bien à un pic pluviométrique et de ne pas pouvoir le traduire correctement sur la carte.

Je me souviens aussi m'être servi du passage de la « *marche des pluies en France* », où Alfred Angot²² indique que la courbe des précipitations moyennes mensuelles sur le Morvan au dessus de 600 mètres d'altitude est la même que celle observée sur les côtes de la Manche, par exemple à Cherbourg²³. Cette observation d'Angot m'a conduit à ne pas m'autocensurer²⁴ et à établir, avec le gradient ad hoc, une isohyète de 2000 millimètres sur le Haut Follin, le sommet du bassin de la Seine, à 902 mètres d'altitude, situé sur la commune de Saint-Bris en Saône-et-Loire. C'est un petit plaisir qu'on ne se refuse pas. Sur le versant oriental opposé, les précipitations décroissent très rapidement : c'est l'effet d'abri sous le vent pluvieux, inverse de celui du foehn pour les températures.

J'ai le souvenir que mon rapport de présentation fut beaucoup trop long, en tout cas pas assez concis, recherchant, à la manière de certains géographes, des explications qui ne pouvaient être que des suppositions, à la rigueur des pistes de recherche, la plupart menant au fond d'une impasse. Cependant, l'essentiel y était : la carte finale qui ne fut jamais remise en cause, la carte des zones d'égal gradient et les graphiques correspondant à chaque zone. Jamais on ne me questionna sur ces documents. Par souci d'informer, un rapport fut ronéoté et envoyé aux administrations supposées intéressées. De mon côté, j'arrosai quelques personnes dont les membres de mon jury de thèse. Beaucoup accusèrent réception avec sympathie. La seule réaction contestataire provint de l'institut de géographie de Strasbourg : elle émanait du professeur Jean Tricart, qui disait en gros, sur la foi d'un de ses assistants, que tout mon travail ne tenait pas la route. Je me souviens encore du sourire en coin de Valiron, à qui j'avais tenu à communiquer cette lettre.

22. Je ne suis pas certain que ceux qui se targuent d'être « climatologues » aient vraiment lu cette somme d'Alfred Angot publiée vers la fin du 19^{ème} siècle, ni les autres ouvrages remplis d'observations pertinentes de cet auteur aujourd'hui oublié.

23. Avec un maximum très prononcé en automne et un minimum au printemps. Dans les années 1970, cette observation a aussi beaucoup servi à inventer et à cartographier les débits d'étiage des rivières côtières du Cotentin dépourvues de stations de jaugeage, en utilisant les données hydrométriques du Morvan sur le bassin de la Cure, au barrage de Chaumeçon et à celui du Crescent.

24. Je choisis délibérément ce verbe, car tout au long de ma vie professionnelle j'ai pu constater une attitude (on dirait « posture » aujourd'hui) tendant à minorer la réalité pour ne pas s'attirer d'ennuis. Il existe d'autres attitudes tout à fait inverses, prises pour attirer l'attention sur soi, sans égards pour l'honnêteté scientifique.

A vrai dire, je fus amené à réutiliser cette méthodologie à l'occasion de la publication des annuaires du réseau pluviométrique complémentaire²⁵ de 350 pluviomètres dont l'installation se termina fin 1971²⁶. Et de 1969 à 1975²⁷ inclus, je refis la même cartographie, appliquée cette fois au total millésimé de la pluie annuelle²⁸. Quand tous les éléments étaient à ma disposition, il me fallait 3 jours pour livrer un brouillon de carte lisible par le dessinateur. Au fil des années, contrairement à ce que je m'étais figuré a priori, il me fallait chaque fois re-délimiter les zones de gradient pluviométrique. Les limites ne se superposaient ni avec celles de la moyenne 31-60, ni avec celles d'un autre millésime. Cela resta gravé quelque part dans ma tête. Aujourd'hui, je pense que le gradient pluviométrique a quelque chose à voir avec la direction moyenne des vents pluvieux au cours de la période concernée, que ce soit la période 31-60 ou une autre période ou une année donnée.

Continuation sur la cartographie des « normales » de pluies mensuelles.

Après quelques essais infructueux, je me suis résolu à prendre la méthode de base de la cartographie consistant à filer les isohyètes de 10 en 10 millimètres ou de 20 en 20, en répartissant proportionnellement l'écart entre les valeurs affichées à 2 stations voisines sur la distance les séparant. C'est-à-dire que je renonçai à prendre en compte l'influence du relief, contrairement aux totaux annuels, tout simplement parce que rien ne me permettait de l'établir. Les cartes ont été élaborées de façon classique pour chacun des 12 mois de l'année civile. C'est une manière de représenter l'effet cyclique saisonnier, en gardant en mémoire que les « normales » mensuelles ne sont pas directement comparables entre elles du fait d'une durée allant de 28, 29 jours (février) à 30 et 31 jours pour les autres mois.

25. Voir au chapitre suivant « la fabrication des données quotidiennes ». Bien évidemment les cartes de ces annuaires étaient établies en utilisant aussi les données du réseau principal de la Météorologie nationale.

26. L'idée de base de ce réseau complémentaire était de densifier les points de mesures pour conforter notre connaissance de la pluviométrie, notamment dans les zones de relief, même si l'altitude moyenne du bassin n'est que de 150 m, et celle des débits au moyen de corrélations pluie – débit très en vogue à l'époque.

27. Date du transfert de la gestion du réseau pluviométrique complémentaire à la Météorologie nationale.

28. Bien entendu, les données du réseau de la Météorologie nationale y figuraient aussi.

Chapitre 3

La fabrication des données quotidiennes : le pourquoi et le comment

Bref historique des réseaux pluviométriques français

Les travaux fondateurs de Pierre Perrault publiés en 1674 sur l'origine des fontaines prouvent « par des mesures précises dans le haut bassin de la Seine que les précipitations sont à elles seules suffisantes pour assurer le débit des cours d'eau et des sources²⁹ ». Ces résultats sont confirmés par ceux d'Edmée Mariotte quelques années plus tard. Durant tout le 18^{ème} siècle et la première moitié du 19^{ème} siècle en France, ceux qui pratiquent le mesurage des précipitations sont essentiellement des esprits curieux d'origines diverses, de sensibilité naturaliste, intéressés par l'observation d'un phénomène pour sa connaissance, mais parfois aussi avec une finalité en tête comme les agriculteurs, les médecins, les pharmaciens, les forestiers, les ingénieurs des ponts et chaussées. A tous ceux-là, il convient d'ajouter les physiciens des observatoires répartis dans toute l'Europe, et dont la mise en place remonte à l'époque des Pascal et Torricelli après l'invention du baromètre. Tous ces naturalistes communiquent entre eux par le truchement d'une association souvent locale. Au niveau national il y a la publication de l'annuaire météorologique de France, recueil très riche d'observations et d'articles. C'est ainsi que j'ai appris, grâce à l'article de Collin, ingénieur des ponts et chaussées chargé de la construction du canal de Bourgogne et de son alimentation en eau,

29. Extrait de « *L'origine et évolution des concepts des eaux souterraines* » de Gilbert Castany. Ce dernier constitua avec Jean Margat et de nombreux autres la remarquable école française d'hydrogéologie de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle.

l'existence d'un réseau de 4 stations dotées de bacs mis en place dès 1830 pour mesurer l'évaporation. Dans un autre domaine, le Dr Lortet a été le précurseur de la prévision des crues de la Saône vers 1850. Et je ne résiste pas à vous conseiller la lecture de l'article de Ch. Martins « *Des climats de la France et de leur influence sur son agriculture et le génie de ses habitants* » pages 113 à 138 de l'annuaire météorologique de la France de 1850 : cela vous donnera un aperçu des connaissances de l'époque avec, de surcroît, un délicieux chapitre sur « le climat de la France a-t-il changé ? »

Le premier réseau d'envergure est celui que Belgrand constitua sur le bassin de la Seine au début des années 1850. Ce réseau devint une référence en Europe et l'institut Vituki s'en inspira pour constituer le réseau hydrométéorologique hongrois, lequel traversa tous les régimes pourtant fort différents jusqu'en 1990, date de son démantèlement par le libéralisme triomphant. Celui construit par Belgrand était dédié à la connaissance hydrologique et organisé par bassin versant, d'amont en aval. Durant cette période, il n'y eut pas de publication des données quotidiennes et les archives manuscrites des observateurs furent brûlées dans l'incendie de l'Hôtel de Ville en mai 1871. Jean Tixeront, qui fréquentait les bouquinistes, avait trouvé des publications sous forme graphique des états de l'eau de la Seine, distinguant trois catégories : clair, louche, trouble, mais rien ne concernait la pluie.

Le principe organisationnel conçu par Belgrand fut repris par le Bureau Central de la Météorologie mis en place en 1876-1878 et les publications des données quotidiennes se firent par mois et par bassin hydrographique d'amont en aval. Cela dura jusqu'à la Grande Guerre. Les changements effectués dès l'après-guerre sous la direction du colonel Delcambre se traduisirent par la publication d'un volume annuel des données quotidiennes, sous forme de tableaux mensuels où les stations sont disposées en ordre alphabétique par département et par commune. Un autre signe démonstratif du désintérêt pour la pluie est que le nombre de stations faisant l'objet de la publication décru rapidement pour n'atteindre que 2 ou 3 par département, avec des délais de publication de plusieurs années. Et pourtant, sur le terrain les observateurs continuaient leur travail quotidien. Il faut leur rendre un hommage particulier et aussi à ces personnes, comme Marcel Garnier, qui n'eurent de cesse de fouiller les archives pour en réaliser des synthèses fort utiles pour des néophytes de mon genre. En 1940, l'année de la débâcle, les

données pluviométriques de 1934 n'avaient pas encore été publiées. Elles ne le furent jamais. Ce n'est qu'au début des années 1960 que la Météorologie nationale confia les archives de la période des 12 années 1934-1945 au BRGM pour réaliser les manuscrits des collectifs mensuels départementaux³⁰ sur des supports spéciaux prévus pour effectuer des tirages héliographiques à la demande.

En 1946, une ordonnance redonna vigueur au réseau climatologique lequel incluait les pluviomètres tenus par des bénévoles. Leur nombre était calé sur le nombre de cantons, soit approximativement 3300 pour la France métropolitaine. Un grand nombre de postes furent installés au chef-lieu de canton qui se situe assez souvent dans la zone de basse altitude, à un nœud de communication. A partir de 1946, les données pluviométriques quotidiennes d'une station sont publiées sous forme d'un tableau annuel et les stations sont classées par ordre alphabétique : ce sont des annuaires. Plus tard, on reviendra à la publication de fascicules mensuels par département, les stations étant disposées par ordre alphabétique.

Voilà pour le produit final proposé par l'organisme gestionnaire du réseau. Intéressons nous maintenant à ce qui se passe avant la publication. Nous n'avons que très peu d'éléments sur ce que recherche le gestionnaire, en particulier le lieu de la station et le type d'observateur. Pour le réseau de Belgrand sur le bassin de la Seine, on peut parier que le lieu est celui d'un ouvrage géré par les ponts et chaussées et que l'observateur fait partie de cette administration. Au fur et à mesure de la succession des différentes organisations, nous perdons le fil.

Pourquoi un réseau pluviométrique complémentaire (RPC) ?

C'est une question que l'on m'a souvent posée, surtout fin 2000, avant que je ne parte en retraite parce que les deux parties, l'agence de

30. Un collectif départemental mensuel se présente comme suit :

- en tête le nom du département, l'année et le mois concernés
- chaque ligne correspond à une station d'observation désignée par le nom de la commune sur laquelle elle se situe ; le classement est effectué par ordre alphabétique des communes sur la première colonne
- ensuite il y a une colonne par jour du mois de 1 à 31 et la dernière colonne contient le total du mois

L'ensemble est consigné sur une feuille de dimensions imposantes.

l'eau Seine-Normandie et Météo-France voulaient se débarrasser de ce boulet. Au début, je répondais en avançant les arguments techniques que j'avais développés pour présenter le projet devant la mission déléguée de bassin en 1969, à savoir :

- la densité insuffisante des pluviomètres : rien qu'en Angleterre, il y avait une densité 2 à 3 fois supérieure, avec une organisation et un équipement différents ;
- la situation des postes existants presque exclusivement dans les zones basses des différents bassins hydrographiques : au cours de la cartographie des normales j'avais dû recourir à la recherche des relations entre les totaux annuels et l'altitude des stations, les fameux gradients pluviométriques ;
- les « relations pluies débits » en vogue à l'époque et les espoirs qui y étaient mis pour mieux connaître les ressources en eau superficielles et souterraines ;
- la mise en place de 40 pluviographes pour mieux voir comment se déroulaient les pluies sur de courts espaces de temps comme l'heure, voire la minute.

Tels étaient les principaux arguments techniques que je régurgitais régulièrement jusqu'à ce que je change d'activité et que le RPC, transféré depuis 1975 à la Météorologie nationale, soit suivi à l'agence par quelqu'un d'autre en 1986, date à laquelle on me chargea des projets de banques de données sur l'eau qui devinrent nationaux dès 1988. Ce que j'omettais de dire, c'est que l'argumentaire concernant les espoirs mis dans la réalisation de relations pluie débits fiables s'était effondré, au moins dans mon esprit, dès le tout début des années 1970 et que je l'avais relégué au magasin des illusions perdues.

Quelques semaines avant mon départ en retraite, je fus interpellé par Le Berre de Météo-France³¹, qui était chargé de statuer sur le sort du RPC, sachant que de son côté l'agence y réfléchissait. Je répondis évasivement, prétextant que pour ma part c'était une expérience fort ancienne. Mon collègue Jean-Pierre Tabuchi, l'un des meilleurs

31. La Météorologie nationale était une direction du ministère des transports, donc un service de l'Etat. Au début des années 1990 ce service fut remplacé par un établissement public de l'état, appelé Météo-France.

spécialistes français de l'assainissement des eaux pluviales, était présent. C'était au cours d'un repas à la cantine. Je ne sais pas ce qu'attendait Le Berre, mais ma non-réponse ou mon mutisme ne lui convenait certainement pas. Aujourd'hui, je me remémore les circonstances de la création du RPC. Je vois encore François Valiron assisté de Jean Thévenin, son adjoint pour les ressources en eau, me dire fin 1968 début 1969, que ce serait bien de réaliser un réseau pluviométrique complémentaire de celui de la Météorologie nationale sous l'égide de la mission déléguée de bassin et que l'agence financerait. Pour cela, il demanderait au conseil d'administration un financement de 350 000 francs par an pour les trois ans à venir, à charge pour moi de faire en sorte que ça couvre les frais d'installation et de fonctionnement. Il me demanda de faire rapidement un projet en ce sens et de commencer la réalisation. Qui avait convaincu Valiron de cette idée ? Sans doute Jean Tixeront et moi lui avions signalé les insuffisances du réseau pluviométrique, sans plus.

François Valiron avait deux casquettes qu'il conservera jusqu'à son départ forcé en 1979 :

- celle de secrétaire de la mission déléguée de bassin Seine-Normandie ; c'est un organisme dans lequel ne siégeaient que des représentants des différents services de l'Etat, responsables à des titres divers des problèmes de gestion de l'eau. Sa compétence se limitait à faire des constats et à proposer les études à entreprendre pour améliorer la connaissance sous les différents aspects de quantité et de qualité.
- celle de directeur de l'agence financière éponyme, avec un homme hors du commun comme président du conseil d'administration : Paul Delouvrier.

Valiron savait que la mise en place du système des agences de bassin dans le cadre de l'application de la loi sur l'eau du 16 décembre 1964 allait être semée d'embûches. Il m'a dit à plusieurs reprises que l'agence était le poil à gratter des administrations. Il s'agissait de faire bouger les limites classiques de l'administration territoriale vers celles nouvelles des bassins hydrographiques et de s'assurer le concours des divers services concernés par l'eau, et intervenant sur les équipements, existants ou en projet, pour mobiliser sa ressource et pour préserver sa qualité. Pratiquement tous les ministères étaient impliqués dans cette affaire.

Avec le recul, je pense que la motivation réelle de Valiron en faveur de la création du RPC était d'associer les grands corps techniques de l'Etat dans des projets communs, pour ne pas donner l'impression de les laisser de côté, et de les intéresser à la mise en œuvre de la loi sur l'eau du 16 décembre 1964.

Il s'ensuivit un montage financier et organisationnel digne d'une ébauche d'un dessin de Dubout. Valiron était très attentif à ce que les parties prenantes d'un projet mettent la main à la poche et apportent une participation financière à sa réalisation. Le ministère de l'Agriculture proposa une participation en nature : les SRAE étaient chargés de la moitié des postes du RPC, du recrutement et du suivi des observateurs et de l'installation des pluviomètres. Le ministère de l'Equipeement se déchargeait sur l'agence de ses obligations pour l'autre moitié des postes par une convention garantissant un apport financier pour un ensemble d'opérations couvrant aussi la réalisation de jaugeages sur les stations hydrométriques du service de la navigation en collaboration avec le service de jaugeage de la circonscription électrique Nord et Paris, laquelle dépendait du ministère de l'Industrie.... ! Je passe sur les détails. Par la suite, Valiron demanda à Jean Cornet, notre hydrogéologue d'alors, de faire un projet de réseau piézométrique complémentaire qui impliquait de facto le ministère de l'Industrie via le BRGM. Le tour de table des grands corps techniques était achevé.

Revenons à notre problème de densité de réseau. Si l'on densifie les points de mesure quotidienne des précipitations, on devrait en principe mieux connaître la lame d'eau précipitée sur une surface quelconque pour les 24 heures entre 6 h TUC du jour J-1 et le jour J. La seule question qui se pose est de savoir combien. Les 2 volets de la question, à savoir combien de postes et combien d'argent, sont étroitement liés. On sait que ce raisonnement est imparable. C'est un peu celui de Valiron : « vous aurez 350 000 F par an, débrouillez-vous ». A partir de là, vous imaginez ce qu'il est possible de faire. Et au fil des années, vous devrez harmoniser ou optimiser votre réseau, c'est-à-dire plus prosaïquement réduire la voilure pour satisfaire à une décision d'une toute autre nature prise par le conseil d'administration. « Il nous faut réduire les dépenses de fonctionnement, l'argent libéré devant servir à financer les ouvrages ». Le budget « études générales » fait partie du fonctionnement et le financement du réseau d'observation avait été imputé sur ce poste budgétaire. Ce fut une erreur dès le départ, car tout réseau d'observation

environnementale – et le réseau pluviométrique en est un – est forcément un investissement sur le long terme. Donc, le RPC a subi une contraction budgétaire de 20% dès 1977. La question qui se posait à moi était la suivante : diminuer le nombre de postes ou reporter à des jours meilleurs, l'opération de saisie informatique des pluviogrammes et leur exploitation, ces deux types de travaux devenant avec le temps, plus facilement réalisables techniquement³² et économiquement. J'ai décidé de conserver la densité, sur la base de la finalité de départ – amélioration de la connaissance générale, avec pour vocation principale l'évaluation des ressources en eau – que j'avais attribuée à ce réseau mais qui n'était vraisemblablement pas celle de mon directeur général comme je l'ai indiqué plus haut. A cette époque, la gestion du réseau complémentaire avait déjà été transférée à la Météorologie nationale depuis deux ans, avec le financement de l'agence : je n'en étais plus directement responsable et j'avais beaucoup d'autres activités d'études. Mais j'avais bon espoir pour que les données pluviographiques soient un jour numérisées et exploitées. Je ne sais ce qu'il en est advenu : en 1986, suite à une réorganisation interne de l'agence, je ne fus plus chargé du RPC. Mon successeur eut pour consigne de restreindre la finalité de connaissance générale au seul management des réseaux d'assainissement d'eaux pluviales en zone urbaine sur un certain nombre d'agglomérations du bassin où on avait identifié des problèmes potentiels et où l'agence pouvait intervenir financièrement. On connaît à peu près le coût de l'augmentation du nombre de postes d'observation : mais pour quel résultat en terme de précision sur la lame d'eau précipitée ? C'est bien là un des points essentiels, surtout lorsqu'on veut faire des « relations pluies débits » le moyen de connaître les écoulements partout où cela est nécessaire, sans forcément truffer les cours d'eau de stations de jaugeage beaucoup plus coûteuses, et en s'appuyant sur les longues chroniques pluviométriques. En effet, comment arriver à définir cet optimum de densité ? Cette question de la précision de l'estimation de la lame d'eau précipitée avait toujours été évacuée. En ce moment même, soit 26 ans plus tard, je ne sais si c'est encore le cas malgré le radar et autres technologies.

Maintenant, venons-en aux problèmes de gestion du réseau et aux diverses maltraitements qu'il subit. Lorsque je fus confronté au problème

32. La table à digitaliser qui nécessite une longue préparation manuelle des pluviogrammes, l'enregistrement direct sur cassette magnétique des basculements d'augets sur site dès 1983, enfin les technologies plus rapides de numérisation des courbes.

de la rémunération des observateurs du réseau pluviométrique complémentaire, je me suis enquis des pratiques exercées par la Météorologie nationale et par d'autres organismes comme EDF pour son réseau hydrométéorologique qui couvrait les zones montagneuses. Très vite, je me rendis compte des disparités et du peu de soin accordé à ces piliers de l'édifice que sont les observateurs, par certains responsables de haut niveau. A la Météorologie nationale, l'indemnité³³ accordée à l'observateur bénévole était fixée par un texte réglementaire dans le cadre de la loi de finance. Sa revalorisation devenait un problème récurrent, discuté au sein de la commission « hydrologie » du Conseil supérieur de la météorologie qui formulait chaque année le même vœu en ce sens, pour que la direction de la météorologie fasse le nécessaire. Et chaque fois, nous avions une réponse dans laquelle la rue de Rivoli³⁴ accédait ou non à notre demande, selon les circonstances. Si bien que l'indemnité fixée au cours des années dépérissait inexorablement du fait de l'inflation. Parmi les chefs de stations météorologiques départementales, il y en eut de nombreux préoccupés de cette situation. La seule solution qu'ils trouvaient était de démarcher le conseil général de leur département afin d'obtenir une subvention pour l'attribution d'une indemnité complémentaire à leurs observateurs, laquelle variait d'un département à l'autre. J'ignore encore comment la mécanique financière arrivait à effectuer ce versement complémentaire à l'observateur bénévole : apparemment cela fonctionnait bien. Cependant, la remarque du citoyen d'aujourd'hui est que la ressource du Ministère des finances c'est l'impôt, tout comme la subvention du département : alors pourquoi cette complication, qui de surcroît coûte cher en fonctionnement, au lieu d'indemniser correctement les observateurs et de mettre la connaissance des phénomènes naturels au centre des préoccupations plutôt que d'en troubler les résultats de façon indélébile, sous le prétexte d'économies mesquines ? Ces histoires de budget ressemblent à des parties de bonneteau : qui en bénéficie réellement ?

Je devais fixer un ordre de grandeur raisonnable de l'indemnité à verser à l'observateur du RPC. C'était un préalable indispensable avant de procéder à leur recrutement sur le terrain. Je me suis alors souvenu du conflit d'ado que j'avais eu avec mon père lorsqu'il fut décoré de

33. Le terme « indemnité » signifiait que cette somme n'était pas imposable sur le revenu de l'observateur.

34. L'ancêtre de Bercy

la légion d'honneur vers 1955 pour ses faits durant la Grande Guerre. Lors de l'attaque d'avril 1917 nos artilleurs tirèrent trop court durant 2 jours et mon père ne fut mutilé par un obus de 75 français qu'à la dernière heure. La plupart de ses camarades étaient morts exsangues. Il était mitrailleur dans un régiment de zouaves, soldat de première classe, déjà décoré de la croix de guerre et de la médaille militaire avec plusieurs citations. Mon indignation portait sur la remise de ce nouveau hochet si longtemps après. Mon père m'avait alors dit : « gamin, ça va payer le tabac », parce que le récipiendaire de la médaille de chevalier de la légion d'honneur avait droit au versement régulier d'une indemnité. Comme à l'époque de la création du réseau complémentaire je fumais 3 paquets de cigarettes par jour, j'avais un élément concret pour fixer un ordre de grandeur acceptable. Finalement le montant de l'indemnité versée aux observateurs du RPC avoisina le double de celle de la Météorologie nationale et fut réajustée annuellement de façon analogue aux salaires de la fonction publique. Je ne me souviens plus de la mécanique du versement de l'indemnité, ni de sa cadence. La partie « agriculture » du RPC, soit la moitié des postes, était gérée directement par les services régionaux d'aménagement des eaux (SRAE). Il devenait difficile de critiquer la pratique de la Météorologie nationale car on parvenait aisément à davantage de complications.

Ce qu'il faut bien comprendre, c'est ce que recouvre la notion d'observateurs bénévoles, par opposition aux professionnels. Ce n'est pas le montant de l'indemnité qui attire les candidats. C'est d'abord leur curiosité personnelle, l'attrait de prendre part à une organisation publique et utile, soucieuse d'appréhender les phénomènes naturels, et leur disponibilité à exécuter des observations chaque matin à la même heure, si possible proche de 6 heures TUC. Et comme il convient d'établir un contrat entre l'organisme public et la personne choisie pour ce travail, il devient naturel d'établir une rémunération. La formation de l'observateur est succincte. On lui présente d'abord le matériel, le pluviomètre et son éprouvette, incorporée ou non ; le carnet d'observation avec le feuillet à détacher et à poster une fois entièrement rempli. Est-ce qu'il est d'accord pour placer le pluviomètre à cet endroit précis, sur son terrain, sans que cela ne le gêne trop, et en respectant la distance aux obstacles environnants ? C'est de chez lui qu'il viendra tous les matins, quel que soit le temps du moment. Je ne sais pas comment tout cela fonctionne aujourd'hui : si je décris la situation d'alors, c'est parce

qu'elle conserve la tradition de l'observation bénévole depuis la moitié du 19^{ème} siècle et qu'elle rend les données comparables sur toute cette période. On lui explique comment manipuler le pluviomètre et l'éprouvette, faire le relevé et remplir la feuille d'observation. Le recruteur a amené avec lui le nécessaire pour faire le trou dans le sol et fixer le piquet supportant le pluviomètre.

Au bureau, on attend la réception de la première feuille de relevés. Dans la gestion du RPC, les quantités marquées par l'observateur sont reportées sur un bordereau de saisie informatique³⁵ : il est interdit d'apporter une quelconque modification aux quantités notées par l'observateur. Puis la feuille de relevés est notée de 3 points de vue : l'aspect d'ensemble de la feuille (netteté, lisibilité), la complétude des relevés quantitatifs et la pertinence des annotations les accompagnant. Enfin on procède au total des quantités de pluie observées, de manière à se doter d'un contrôle de cette phase du travail par un programme mécanographique³⁶ avec la sortie des listings correspondants. Ces derniers sont envoyés aux responsables, les SRAE pour la partie « agriculture » du réseau et les 3 recruteurs de la partie « équipement ». Cela les tient informés et les incite à faire les visites nécessaires, par exemple lorsque les notes ne sont pas suffisamment bonnes, ou pour demander des explications sur des valeurs jugées anormales. S'il n'y avait pas de remède approprié pour rendre satisfaisant le travail de l'observateur, le recruteur devait mettre fin au contrat et trouver un successeur : ce fut un événement rare pour la partie équipement du réseau. Reste le problème du report de la quantité mesurée le jour j à 6 heures TUC au jour j-1. C'est une idée qui est apparue dans les années trente selon laquelle on ne pouvait décemment pas attribuer un relevé pluviométrique effectué à 6 heures du matin à la journée en cours, puisque ce relevé ne représentait que le quart du temps du jour en question. Alors il fut décidé par l'organisation internationale du moment, que tous les relevés devaient être reportés au jour précédent. Inutile de décrire toutes les erreurs commises au nom de cette sottise. Au départ, on peut penser que le trouble des esprits est analogue à celui engendré par le changement d'horaire saisonnier de l'heure d'hiver à celle d'été et inversement. Dans ces

35. Dans les débuts du RPC nous sommes encore dans le système de cartes perforées. L'encodage magnétique viendra quelques années plus tard.

36. J'étais fasciné lorsque j'assistais à la programmation de sortie du listing décadaire : la vélocité avec laquelle le chef d'atelier mettait les fiches câblées 2 à 2 dans la tablette ad hoc, avant l'édition des résultats.

cas-là, tout rentre dans l'ordre dans la journée qui suit. Dans le cas des observations pluviométriques, la conséquence est autrement plus préjudiciable, car elle affecte directement la chaîne de traitement des données qui va de l'observateur à la publication en passant par plusieurs étapes de mises en forme et de contrôles plus ou moins judicieux. Et au final, il est difficile de prétendre à coup sûr, que la donnée publiée correspond bien à celle observée et à sa datation au jour antérieur. Aujourd'hui, je ne me souviens plus très bien comment nous avons procédé : cette affaire m'a tellement traumatisé à l'époque que j'en ai perdu la mémoire précise de son traitement.

Il y a un *a priori* de la part des météorologistes vis-à-vis des bénévoles. En gros, on peut le résumer ainsi : ce ne sont pas des professionnels comme nous et forcément ils commettent des erreurs que nous ne faisons pas. C'est tellement ancré dans leur tête que toute l'institution en charge des observations bénévoles ne se prive aucunement de modifier soit la quantité mesurée, soit sa date d'occurrence. C'est ce qu'un technicien décrivait à Jean Yves Grosse, alors responsable du bureau de l'eau³⁷, comme étant la caporalisation des jours de pluie. Ce technicien avait entre les mains les collectifs départementaux mensuels et d'autre part avait accès aux relevés des observateurs. Il voyait bien qu'au niveau départemental, on avait le souci d'homogénéiser les jours de pluie et de tout reporter au même jour l'observation faite à J-1 ou J-2 à tel endroit avec l'observation faite à J+1 à tel autre, sur la base de celle effectuée à la station officielle, là où opère le « caporal ». Le « tous en rang », c'est le premier aspect de la caporalisation, jugé à tort pas très grave par certains utilisateurs lorsqu'il s'agit d'une quantité très faible, inférieure au millimètre, et intolérable par d'autres qui soulignent une pratique indigne. En effet lorsqu'on veut effectuer une corrélation entre deux postes voisins, il importe que les observations ne soient pas trafiquées. En revanche, l'autre aspect, le « je ne veux voir qu'une seule tête » est beaucoup plus ennuyeux, lorsqu'il s'agit de l'écêtement pur et simple d'une valeur exceptionnelle, parce qu'elle est très différente de celle observée à la station officielle. Ce fait a été dénoncé à de multiples reprises, en particulier par des hydrologues comme Maurice Pardé³⁸ ou ses élèves dont Lucette Davy dans sa thèse, pour ne citer que ces deux

37. Voir plus bas sa description au chapitre 11.

38. Maurice Pardé se disait à juste titre « potamologue », parce qu'il consacra sa vie à l'étude des cours d'eau. Le terme « hydrologue » est bien trop vaste pour être précis.

exemples. Moi-même j'ai pu constater ce fait : je me souviens des pluies exceptionnelles sur la Marne et la Haute-Marne les 3 et 6 juillet 1972. Notre station du réseau complémentaire de Bar-sur-Aube, située en limite du département de Haute-Marne avait enregistré 35 millimètres l'un des deux jours en question, valeur confirmée par l'enregistrement du pluviographe qui lui était associé. Un poste de la météorologie nationale avait aussi été installé depuis peu à Bar-sur-Aube : il n'obtint que quelques dixièmes de mm sur le collectif départemental. Je me mets à la place du technicien météo qui est basé à la station officielle de Romilly-sur-Seine, à l'autre bout du département de l'Aube où il n'est pas tombé une seule goutte et qui vient de recevoir les feuilles mensuelles des observateurs. Il constate que sur la partie orientale du département il y a bien 1 dixième de millimètre ici, 3 ou 4 par là, guère plus sauf à Bar-sur-Aube. Il n'a aucune information sur les départements voisins. Il lui faut décider et il tranche. Et il est peut-être à ce poste qu'il considère relever de la bureaucratie alors qu'il souhaiterait être à la prévision où il aurait pu s'épanouir. Allez savoir. Ce qu'il faut retenir de cet exemple où il y a une part de fiction, c'est ceci : lorsqu'on a la compétence sur un territoire bien défini, en l'occurrence le département, on doit chercher à connaître ce qu'il se passe au-delà de cette limite pour éviter ce genre de situation. C'est à la direction générale d'en avoir conscience et de résoudre ce problème : encore faut-il qu'elle considère que l'application de l'ordonnance de 1946 sur les données climatologiques, tâche aussi essentielle que la prévision, nécessite une constante remise en question. Le problème c'est que dans la réalité, l'observation climatologique au sol passait bien après les espoirs mis dans les progrès de la prévision numérique. Lorsque les écarts concernent plusieurs dizaines de millimètres, voire plusieurs centaines comme ceux signalés par Pardé dans les Cévennes et les Pyrénées-Orientales, on ne peut que mettre en garde les utilisateurs de tous bords.

C'est pourquoi j'ai toujours préconisé d'éditer la valeur produite par l'observateur, quitte à ce que l'utilisateur final prenne sa propre responsabilité vis-à-vis de cette valeur. Par ailleurs, le gestionnaire de réseau doit être très attentif à ce problème et intervenir au plus vite auprès de l'observateur pour identifier ce qu'il s'est réellement passé et confirmer ou émettre un doute sur la donnée produite. L'intervention au plus vite est l'atout principal d'une bonne gestion du réseau. Lorsque j'ai eu à choisir le cadencement des envois des relevés des observateurs, j'ai tout

de suite compris que le rythme mensuel était trop long. J'en ai discuté avec Pierre Guillot, qui gérât le réseau de la Division Technique Générale d'EDF à Grenoble et qui n'avait aucune obligation de publication. Simplement, il devait faire son travail de prévision de la ressource en eau en amont des barrages hydroélectriques. Il avait trouvé que le bon choix satisfaisant à la fois son besoin principal et les contraintes de gestion du personnel était le rythme hebdomadaire. En conséquence, l'observateur, après son dernier relevé de la semaine, détachait la feuille, la mettait sous enveloppe et la postait. Je ne sais plus si le dernier relevé était le dimanche ou le lundi : c'est sans grande importance. Le carnet à souche de relevés était annuel et composé de feuillets hebdomadaires détachables.

Pour le réseau complémentaire, j'avais l'obligation d'éditer les données. Ce seul élément a pesé sur le choix de la cadence de plusieurs façons, principalement par l'étape incontournable de la mécanographie, puisque nous en étions encore à l'utilisation des cartes perforées. Par ailleurs, je me suis fixé l'objectif de traiter les données au fur et à mesure sans entasser les relevés durant des mois, comme c'était le cas des données hydrométriques de la circonscription électrique. Le 1^{er} janvier 1972 était la date de mise en service de ce système, juste quelques semaines après l'installation des derniers postes pluviométriques du réseau.

En croisant tous ces éléments, j'ai finalement opté pour une cadence décadaire : l'observateur détachait le feuillet le premier jour de la décade suivante, les 1^{ier}, 11, et 21 de chaque mois après l'observation du matin et le mettait à la poste. Au bureau nous traitions les relevés au fur et à mesure de leur arrivée et l'édition de la décade reçue se faisait au moment où les premiers relevés de la décade suivante parvenaient à l'agence. La publication de l'annuaire était mise en route chez l'imprimeur vers la fin du mois de janvier de l'année suivante et les organismes destinataires recevaient leur exemplaire au début du second trimestre.

L'équipe de gestion de l'agence était composée d'un responsable au siège assisté de 2 personnes : réception des relevés, mise sur bordereau de perforation, commandes diverses (matériels, carnets de relevés, publication, ...), échange de correspondances avec les responsables en contact avec les observateurs, établissements des indemnités des observateurs et des honoraires des responsables de secteur en relation avec le

service comptabilité de l'agence et l'agence comptable, archivage des relevés et des bordereaux. Sur le terrain, outre les observateurs, et pour la seule partie ministère de l'équipement, 3 personnes chargées chacune d'un secteur, l'Ouest, le Nord et le Sud Est du bassin pour le recrutement, l'installation des postes, les visites régulières et exceptionnelles avec leurs comptes rendus. C'étaient des retraités, deux d'entre eux avaient travaillé à la météo et le troisième était instituteur. Ils étaient rémunérés en tant que travailleurs indépendants et défrayés de leurs frais de déplacements. Des demandes régulières de travaux étaient présentées à l'atelier de mécanographie pour la saisie, la sortie des listings décennaires, les corrections et l'édition de l'annuaire. Je me réservais la préparation et la confection de la carte millésimée des isohyètes de l'annuaire et sa mise au propre par le bureau de dessin : j'avais déjà réalisé celle des « normales 1931 -1960 » et je voulais me rendre compte des différences de traitement du gradient pluviométrique et de l'apport des 350 postes du RPC, s'ajoutant aux 450 de la Météorologie nationale.

Les enregistrements des pluviographes ne faisaient l'objet que d'un contrôle et d'un archivage en attendant la mise en place d'une chaîne de traitement informatisée à partir d'une table à digitaliser, par analogie avec ce qui était en cours de mise en œuvre par mes collègues du ministère de l'agriculture pour le traitement des limnigrammes³⁹ des stations de jaugeage qui avaient été installées depuis 1968. Cette situation perdura bien après le transfert de la gestion du RPC à la Météorologie nationale en 1975, jusqu'à la mise en place d'enregistreurs sur cassette magnétique, après 1983.

Un dernier mot sur « la guerre des réseaux ». Un jour, j'appris qu'un de nos observateurs dans la Manche avait été contacté par un agent de la Météorologie nationale pour qu'il envoie ses observations au centre climatologique départemental. Sans doute la flemme de chercher ailleurs guidait cet agent, qui devait satisfaire à l'objectif fixé du nombre de stations, en gros une par canton. Ces observations firent l'objet d'une ligne du collectif départemental sous le nom de la commune dans laquelle résidait l'observateur, par ailleurs très bien noté chez nous. En comparant ces résultats à ceux que nous recevions au titre du réseau complémentaire, je fus surpris de voir qu'il y avait toujours une petite

39. Autrement dit l'enregistrement continu sur papier de la hauteur du cours d'eau en fonction du temps.

différence de 1 à quelques dixièmes de mm, dans un sens ou dans l'autre. Un autre cas se produisit dans les Ardennes, puis quelques autres. Au hasard d'une rencontre avec Pierre Guillot, nous évoquâmes ce sujet : le réseau d'observation de la DTG-EDF avait déjà été victime de ce genre de pratiques. Son interprétation de l'attitude de l'observateur concerné était la suivante : puisqu'il percevait 2 indemnités pour le même travail, il se sentait obligé de produire 2 résultats différents, même légèrement. A l'époque, le RPC était en cours de transfert à la Météorologie nationale et je me contentai de signaler ces faits au futur responsable pour qu'il agisse en conséquence.

Chapitre 4

La constitution des chroniques

Le réseau est en place et se met à fonctionner. De la durée de vie du réseau et de ses successeurs qui prolongeront la vie des stations pluviométriques va dépendre la constitution de longues séries d'observations que l'on appellera « chroniques ». Par exemple les postes installés par Belgrand sur le bassin de la Seine verront leur vie prolongée en 1876 dans le réseau du bureau central de la météorologie, puis dans ceux successifs de la Météorologie nationale, après 1920, puis après 1946. Malgré les changements de finalité d'un gestionnaire de réseau à l'autre, les observateurs se succèdent pour effectuer chaque matin des relevés de pluie à des postes que l'on pense être restés au même endroit, au moins sur le territoire de la même commune, puisque dans notre système français, la commune constitue l'identifiant de la localisation du poste. On a déjà recensé quelques-unes des sources d'erreurs pouvant affecter les résultats des observations au quotidien. Avec la durée vont apparaître d'autres événements qui vont peser sur la chronique jusqu'à la déformer et la rendre hétérogène.

Envisageons maintenant ce qui peut changer au cours des années d'observation et introduire de l'hétérogénéité dans les chroniques. La lacune d'observation proprement dite : pour une raison quelconque, l'observation n'a pas été réalisée sur une période donnée. Il y a interruption pure et simple. Le gestionnaire, soucieux de produire une chronique sans lacune va s'ingénier à combler les trous en procédant par interpolation avec les postes les plus proches. Ce travail ne sera effectué par le gestionnaire qu'à l'occasion de la publication des totaux mensuels. Je n'ai jamais vu des données quotidiennes interpolées publiées. Les utilisateurs situés hors de l'organisation gestionnaire du réseau, par exemple

des hydrologues ou des agronomes peuvent pratiquer l'interpolation à des fins qui leur sont propres, sous leur entière responsabilité.

On utilise la méthode de reconstitution d'une donnée manquante par interpolation pour compléter une chronique A de données mensuelles lacunaires, en ce sens qu'il manque une ou plusieurs données mensuelles. Il existe aux proches alentours deux stations B et C dont les observations sont concomitantes sur une même période. Dans la chronique A objet de la reconstitution, il manque par exemple, la donnée du mois de mars 1957. Il s'agit de faire la moyenne des mois de mars concomitants réellement observés aux trois stations, ensuite de réaliser les rapports desdites moyennes, $n = \text{moyenne mars A sur moyenne mars B}$ et $p = \text{moyenne mars A sur moyenne mars C}$. Première reconstitution avec la valeur de mars 1957 observée à la station B multipliée par le rapport n . Deuxième reconstitution avec la valeur de mars 1957 observée à la station C multipliée par le rapport p . Puis on fait la somme des deux valeurs reconstituées et on divise par 2 : on obtient ainsi la valeur reconstituée de mars 1957 dans la chronique de la station A. Cette opération peut se faire avec une seule station, ou 2 comme dans notre exemple ou plusieurs. D'autre part, plus le nombre de stations utilisées est grand, plus on exclue l'éventualité d'une donnée qui, dans la réalité, aurait pu être exceptionnellement petite ou exceptionnellement grande. Autrement dit, avec ce procédé on affaiblit la dispersion, ou l'écart-type, de l'échantillon reconstitué. Et cet affaiblissement croît avec le nombre de données reconstituées dans la chronique. Cette méthode a été décrite au 19ème siècle (je ne sais plus par qui, Angot ou Renou ?), avec un exemple provocateur utilisant les données de Turin pour reconstituer celles de Lyon ! Lorsqu'on a sous les yeux les longues séries publiées par la Météorologie nationale en 1968, on voit que Marcel Garnier a pris la précaution d'indiquer les valeurs reconstituées en les mettant entre parenthèses, ce qui démontre son honnêteté intellectuelle, que j'ai appréciée à de nombreuses reprises. Mais nous ne saurons jamais quelles stations ont été utilisées pour les reconstitutions. Est-ce bien grave ?

En dehors des données lacunaires, voici d'autres sources possibles d'erreurs :

- l'emplacement du poste a dû être changé parce qu'il ne convenait pas, pour une raison quelconque, la plupart du temps inconnue parce qu'elle ne figure pas dans les archives ou tout simplement parce que

le gestionnaire qui dispose des archives n'a pas voulu l'indiquer lors de la publication des résultats. Ce déplacement a pu être effectué sur quelques mètres, comme sur plusieurs kilomètres. Comment savoir ? Et la distance n'a rien à voir avec l'ordre de grandeur de l'écart entre l'avant et l'après de l'événement affectant la série.

- Le poste a eu besoin d'un renouvellement de matériel : par exemple l'éprouvette a été changée parce qu'elle était cassée ou bien le seau a du être remplacé parce qu'il était rouillé. Et ces remplacements de matériels n'ont pas été effectués à l'identique. Le remplacement est obligatoire lorsque le pluviomètre est victime d'un vandale maniaque de la cible et armé d'un lance-pierre ou d'un fusil : un pluviomètre cabossé par les cailloux, voire percé à la chevrotine, défigure le paysage du scientifique.
- Le poste n'était pas conforme aux nouvelles règles édictées entre les deux guerres mondiales par l'instance internationale, l'actuelle OMM, et mises en œuvre par le gestionnaire. Par exemple, la décision que la bague de réception du pluviomètre doit se situer à 1,5 m du sol a causé de nombreux dégâts partout dans le monde. Et sa mise en œuvre s'est déroulée sur plusieurs décennies, c'est-à-dire qu'un poste a été mis aux nouvelles normes à telle date et le poste voisin plusieurs années plus tard.
- Idem pour la recommandation de l'OMM sur la distance d'éloignement des obstacles par rapport à cette même bague de réception.
- Le gestionnaire institutionnel a été transformé et avec lui le protocole de mesurage.
- L'observateur a été remplacé et le suivant ne s'est pas coulé dans les pas du précédent.

La liste est longue, difficilement exhaustive. Tout cela influe sur la série d'observation. Mais comment ? De quelle façon ? Avec quel résultat ? A priori, tous ces événements se traduisent par des écarts systématiques entre l'avant et l'après de la chronique. Ils sont impitoyablement mis en évidence par la technique des doubles cumuls. Cette technique permet d'identifier la date de la rupture (le saut, la cassure) dans la série, presque au jour près. Pour cela, il faut au minimum 3 postes

d'observations concomitantes et avoir la chance qu'aucune d'entre elles n'a subi la même modification à la même date que l'une des deux autres.

La méthode des doubles cumuls est une méthode empirique, très utilisée par les hydrologues, pour se rendre compte de l'homogénéité d'une chronique d'observation.

On veut vérifier l'homogénéité de la chronique de la station A. On cherche alentour les stations les plus proches où les observations se sont déroulées sur la même période. Le principe est tout simple : sur un papier millimétré on reporte le total cumulé de la pluie annuelle millésimée de la station A en fonction de celui de la station B. Admettons que l'exercice commence à l'année n . Le premier point reporté est noté n . Ensuite, le suivant est noté $n+1$ et ainsi de suite. Si une année est manquante sur l'une des deux séries on saute directement à l'année suivante en notant son millésime. En progressant, on voit se dessiner une droite dont la pente peut être estimée graphiquement. S'il n'y a pas de rupture de pente, on peut conclure que les deux séries mises ainsi en relation sont homogènes, c'est-à-dire qu'elles n'ont pas connu un changement quelconque au cours de leur durée de vie. La rupture de pente indique qu'il s'est produit un incident de parcours plus ou moins important sur l'une des deux stations. L'importance de la rupture et du changement de pente de la droite reflète l'importance du changement intervenu sur la station fautive. Pour désigner la station concernée, il faut recourir à un exercice identique avec une troisième station C. On recommence le processus entre A et C et entre B et C pour savoir laquelle des stations est concernée par un changement. Ce dernier équivaut à une rupture, à une cassure dans la chronique. On peut estimer graphiquement la différence en pourcentage entre l'avant et l'après rupture. Mieux, en utilisant les données mensuelles on peut déterminer le mois durant lequel le changement a eu lieu. Les archives de la station, si elles sont disponibles, nous indiquent l'événement cause de la rupture. L'analyse devient un peu plus compliquée avec l'apparition de plusieurs cassures : le fin limier qui dort en vous, va se régaler à trouver la station concernée ! Brunet-Moret, dans les cahiers de l'ORSTOM du début des années 1980, a fait une démonstration mathématique de la validité de la méthode des doubles cumuls. Pour ma part je me suis contenté d'appliquer la méthode de façon empirique et d'en tirer les conclusions sur les cas qui m'intéressaient. Un dernier point : on peut considérer que l'échantillon d'avant la rupture provient d'une population légèrement différente de

la suivante de laquelle est tiré le second échantillon. Le « légèrement » utilisé pour indiquer deux populations issues d'une même commune administrative suppose que la proximité territoriale des deux stations entraîne une faible différence. Dans la réalité cette différence peut quelquefois atteindre, voire dépasser les 20%. La moyenne du mélange se situe dans l'intervalle des moyennes des deux échantillons, celui d'avant et celui d'après la rupture. Que devient l'écart-type du mélange si l'on considère a priori sous le climat du bassin de la Seine, que le rapport de l'écart-type à la moyenne, c'est-à-dire le coefficient de variation, est constant d'une population homogène à l'autre, égal à 0,18 ? C'est une question à laquelle je ne sais pas répondre sans l'avis d'un statisticien confirmé. N'ayant pas l'article de Brunet-Moret sous les yeux, je ne sais pas s'il a étudié ce cas. En mon for intérieur, je pense que le coefficient de variation augmente un peu, surtout s'il y a plusieurs cassures dans la chronique comme c'est le cas dans les séries les plus longues : la probabilité de leurs occurrences augmente avec la durée d'observation. Mais tout cela reste à valider mathématiquement. En bref, plus le temps passe, plus les incidents de parcours deviennent probables, voire effectifs, et l'homogénéité de la chronique s'en trouve affectée.

Chapitre 5

Pourquoi traquer les sauts, les tendances et les cycles ?

Pourquoi vouloir à tout prix des séries homogènes ? L'établissement d'une chronique homogène d'observation a été une obsession de l'hydro-climatologue que j'aspirais être à mes débuts de vie professionnelle : je la partageais d'ailleurs avec quelques autres dont Jean-François Zumstein, mon collègue d'alors à l'agence Rhin-Meuse. Une ferveur des néophytes !

Prenons le problème à l'envers. Une série homogène permet d'étudier correctement le phénomène mesuré parce qu'elle n'est pas affectée par les bruits découlant des événements liés directement aux procédures de l'observations et décrits ci-dessus. Oublions pour le moment que ce désir relève tout bêtement de l'utopie ou d'une illusion, comme il vous conviendra, parce que la vie d'un poste pluviométrique est soumise à de trop nombreux aléas.

Autrement dit, il faudrait éliminer tout ce qui apporte du bruit et des distorsions pour avoir affaire au seul phénomène, ce que nous ne savons pas faire correctement avec certitude. La plupart des aléas dus aux procédures d'observation génèrent une cassure : on dit aussi « saut » ou « rupture », identifiable par la méthode des doubles cumuls. Existe-t-il d'autres effets possibles, tels que la génération d'une tendance ou d'un cycle ? L'introduction d'un cycle au stade du simple mesurage est peu probable, voire impossible, de mon point de vue⁴⁰. Celle d'une

40. Elle est cependant possible au cours du traitement des données : par exemple le mathématicien polonais Slutski a démontré que l'emploi des moyennes mobiles (ou « glissantes », ou « chevauchantes ») génère un effet cyclique à l'intérieur des données utilisées.

tendance est possible du fait d'un changement progressif de l'environnement immédiat du poste pluviométrique, par exemple de jeunes arbres à proximité qui se développent et croissent de plusieurs dizaines de mètres : cela peut affecter de l'ordre du pourcent de la population des points de mesurage. Ce n'est pas négligeable, d'où l'extrême prudence dans l'analyse.

Supposons qu'on ait extirpé les effets des erreurs d'observation pour étudier la variabilité du phénomène de trois points de vue :

- les effets cycliques, comme les cycles diurne et saisonnier, ou d'autres cycles de plus longue période, comme celui des taches solaires ou ceux de Milankovitch ;
- la tendance, à la hausse ou à la baisse ;
- en l'absence des deux précédents, la variabilité aléatoire.

L'existence des effets cycliques naturels doit être abordée en premier lieu. Il faut répondre à la première question suivante : veut-on les mettre en évidence ou bien faire en sorte de les sortir du champ de l'étude pour ne se consacrer qu'à l'un des deux autres, tendance ou variabilité aléatoire ? Pour ma part, j'ai de tout temps choisi de ne me consacrer qu'à la partie aléatoire de la pluie, de loin la plus importante, tellement importante qu'elle masque tout effet tendanciel. C'est mon hypothèse de départ. Il me reste donc à étudier le moyen de réduire à zéro les influences des phénomènes cycliques, pour n'avoir affaire qu'à la variabilité aléatoire. Le cycle journalier n'apparaît pas dans les données à traiter puisque l'observation de base est le total quotidien relevé le matin à 6 heures TUC. Le découpage en totaux pluviométriques annuels liquide de facto l'aspect cyclique saisonnier, puisqu'il totalise les quatre saisons. Arrêtons nous quelques instants sur ce découpage annuel. Le plus courant est le découpage en année civile, du 1^{er} janvier au 31 décembre, qui répond bien à l'effacement de l'effet du cycle saisonnier. Il existe d'autres découpages annuels, en particulier ceux des hydrologues qui étudient les crues : certains préconisent l'année du 1^{er} octobre au 30 septembre, d'autres du 1^{er} septembre au 31 août. Le découpage proposé par Belgrand, aujourd'hui oublié, est plus subtil : du 1^{er} mai au 30 avril. Il a l'énorme avantage de s'appliquer, sur le territoire de Seine-Normandie, à la fois à l'étude des sécheresses et à celle des crues. Le découpage semestriel du 1^{er} janvier au 30 juin

et du 1^{er} juillet au 31 décembre, faute de l'opérer de solstice à solstice, nous a permis à Jean-Marie Masson et à moi d'utiliser le cycle saisonnier pour mettre en évidence le phénomène suivant : il pleut davantage sur l'hémisphère nord durant le second semestre et inversement sur l'hémisphère sud⁴¹. Ce découpage particulier n'avait pas pour objet d'effacer l'effet cyclique, mais au contraire d'en démontrer la réalité.

Les découpages mensuels ou trimestriels peuvent être effectués de deux façons différentes, avec un objectif opposé. Le premier décrit la marche des pluies dans la séquence ordinaire des mois civils, comme l'a fait Alfred Angot dans son gigantesque ouvrage « *La Marche des pluies en France* ». Le second consiste à isoler tous les totaux d'un même mois civil et à tenter de décrire empiriquement leur variabilité. On répète l'opération pour chacun des mois civils. C'est une manière de s'affranchir du cycle saisonnier. Si au contraire on mélange toutes les données de tous les mois civils, on garde l'effet cyclique et on ne sait pas ce qui relève du seul cycle saisonnier et ce qui relève de l'aléatoire.

Restent les cycles de longues durées. En dehors de ceux qui ont une assise astrophysique, comme le cycle des taches solaires de onze ans ou ceux de Milankovitch, j'ai assisté à de nombreuses tentatives fondées sur le cycle supposé des crues du Nil réduit aux sept vaches maigres et autant de grasses, trente trois ans pour la durée de la vie de Jésus-Christ et bien d'autres encore. Ce qui m'avait amené à dénommer ces gens-là : les « cyclistes », parce qu'ils voulaient à tout prix démontrer que leur croyance était la bonne et qu'hors d'elle il n'y avait pas de salut. Que les amateurs de vélo me pardonnent ! C'est fou ce que les séries de Fourier ont pu être utilisées pour « démontrer » l'existence de l'un ou l'autre de ces cycles. Le cycle des taches solaires a fait l'objet de nombreuses tentatives sans résultat satisfaisant : il faut dire que la partie aléatoire est si importante qu'elle masque de façon rédhibitoire les effets attendus d'un tel cycle. En outre le cycle qui était parfois « trouvé » à un endroit ne se reproduisait pas à l'autre. ...

Ah ! J'allais oublier la succession des phases lunaires. Un jour du début juin 1976, en pleine sécheresse de la partie Nord de la France, affectant la totalité de Seine-Normandie, Michel Dargent⁴² me fait

41. Cela a fait l'objet d'un article publié dans *La Houille Blanche* en 1993.

42. Le chef de la division « ressources en eau » à laquelle j'étais rattaché. L'agence avait une direction et 2 autres divisions, « pollution » et « redevances ».

parvenir un mot de Valiron m'intimant de recevoir une société qui prétendait prévoir les précipitations. Dargent était hilare : voilà des gens qui invoquaient la lune pour prévoir la pluie. La requête était parvenue du ministre de l'Agriculture lui-même. Ma première idée était de faire plancher cette équipe devant certains des membres de la section « pluviométrie » que j'animais sur mon temps libre, pour le compte de la SHF. Il y avait dans ce groupe des gens qui rêvaient d'en découdre. Mais très vite je revins à la raison : il fallait que l'agence passe une commande à ce bureau d'études pour en avoir le cœur net. C'était urgent car sur le terrain, la désolation agricole était telle que des processions pour faire pleuvoir se déroulaient un peu partout.

Deux ans plus tôt, ma hiérarchie m'avait forcé à recruter un statisticien pour traiter les volumineux paquets de données de pluie, de débit et de hauteur d'eau réunies sur des bandes magnétiques. A l'époque, j'estimais que ce poste était devenu inutile parce que l'espoir mis dans les relations pluie débit s'était évanoui. De plus, j'avais la programmation des barrages-réservoirs à mener à bien. En fait, j'ai obéi et j'ai reçu les candidats à ce poste. Plusieurs auraient fait l'affaire mais mon choix se porta sur Christiane Ducastelle, qui avait suivi les cours de Benzécri, statisticien de renom, mais aussi parce qu'elle était enceinte : cela me donnait du temps avant son intégration et me permettait de tester ma direction sur le fait de recruter une femme enceinte. Ma direction accepta sans rechigner. C'est donc avec elle que je reçus ces « prévisionnistes » de la pluie. Ils étaient trois : le chef, un homme de 45-50 ans qui se disait colonel en retraite, râblé et corpulent, affirmant se déplacer souvent aux « States », que notre mauvais esprit classa rapidement dans la catégorie des barbouzes. Le second était présenté comme un ingénieur en chef à la retraite de la météo. Nous ne pûmes savoir à quoi correspondait le troisième. Il nous fallait rapidement passer commande en limitant les dégâts possibles sur notre budget : nous nous mîmes d'accord pour cibler trois postes pluviométriques sur le sud-est du bassin. Le météo reçut la documentation dont il avait besoin. De notre côté, nous rédigeâmes la lettre de commande avec le versement d'un acompte équivalent au tiers, comme cela se pratiquait à l'époque. Là, le rôle du statisticien était fondamental pour fixer les règles de l'acceptation de la prévision de très bonne à nulle : de ces résultats dépendaient l'octroi ou non du deuxième acompte puis du solde. Les résultats des prévisions nous furent communiqués manuscrits sur du papier brouillon :

ils étaient complètement en dehors des clous. Il n'y eut pas de versement du deuxième acompte. Et nos escrocs disparurent en empochant 15 000 francs : pour l'agence, c'était l'équivalent au poker d'une mise pour voir si elle aurait pu gagner. En fait, elle avait gagné, car on ne l'y reprendrait plus sur ce terrain-là, du moins tant que les protagonistes feraient encore partie de son personnel. Comme nous ne savons pas ce que le soi-disant météo a fait pour produire sa prévision, l'influence lunaire ne peut être évacuée du champ de la recherche sur cette seule expérience.

Les cycles de Milankovitch évoquent des périodes si longues, de 20 000 à 100 000 ans qu'on ne peut espérer les dévoiler dans nos observations de la pluie, réduites aux deux ou trois derniers siècles. Néanmoins, la question de l'importance de leur influence dans cette part, jugée aujourd'hui entièrement aléatoire faute d'éléments discriminants et probants se pose avec acuité et reste sans réponse pour le moment. La partie aléatoire de la variabilité d'un phénomène discret comme les précipitations sur le globe, les scories de son observation une fois extirpées, englobe forcément tout ce qui n'a pas pu être expliqué. Or, les scories en question ne représentent que peu en regard de cette variabilité considérable, comme nous le verrons avec l'exemple de Seine-Normandie. En l'absence d'explications tendancielle ou cycliques avérées, le traitement des données d'observation impose de prendre parti au préalable sur la stationnarité du phénomène, c'est-à-dire qu'on va ignorer le prétendu réchauffement climatique et sa présumée influence sur les précipitations, puisqu'on ne peut statuer sur un éventuel effet collatéral.

Reste une dernière chose à évacuer à ce stade et qui se relie à une sorte de rupture naturelle : je veux parler des situations cataclysmiques, comme celle qui aboutit à l'extinction des mammoths en quelques instants. Voilà des mammifères de statures imposantes qui passent immédiatement d'un climat tropical – ils ont encore des feuilles de palmiers dans leurs gueules – à l'état congelé. Ils sont si bien conservés qu'on aurait pu en manger : je cite l'un des protagonistes du film d'Elia Kazan « *A l'est d'Eden* », dont l'action se passe en 1917. Dans nos chroniques historiques, il ne s'est pas produit de cataclysme de cette ampleur. Il faut néanmoins garder à l'esprit que la Nature n'a pas de limites.

Chapitre 6

La variabilité des totaux annuels de précipitations

Après la cartographie des « normales » des pluies annuelles et mensuelles, il me revenait d'étudier leur variabilité interannuelle. J'avais à ma disposition des tirages héliographiques d'un document manuscrit établi par Marcel Garnier et qui allait être publié par la Météorologie nationale plusieurs mois plus tard. Il s'agissait d'un recueil de longues séries de données pluviométriques annuelles et mensuelles : 35 concernaient directement les bassins de la Seine et des fleuves côtiers de Normandie et le pourtour immédiat. L'idée me vint d'effectuer des ajustements de lois de probabilités, me contentant de celles de Gauss et de Galton. J'avais dans mes cartons des feuilles de calcul établies par André Lobert, pour réaliser l'ajustement de lois de probabilités par la méthode des moindres carrés, et bien sûr toutes sortes d'autres concernant l'analyse de variance et les corrélations. André Lobert avait, comme Jean-Marie Masson, une formation d'ingénieur agricole liée à l'université de Nancy, et très vite il s'était passionné de statistiques pour rendre service au CERGR à Tunis dans des opérations compliquées d'analyse des résultats d'expérimentation en irrigation ou en cultures en sec. Il avait succédé à Yves Cormary comme chef de la mission du CERGR en 1964. En 1973-74, je le retrouvai avec bonheur pour la programmation des barrages réservoirs du bassin de la Seine lorsqu'il travaillait chez Coyne & Bélier. Il est malheureusement mort dans un accident de la route au Maroc peu de temps après. Ces feuilles de travail me furent fort utiles. Je procédai avec l'aide de 2 techniciens aux ajustements des lois de Gauss et de Galton sur les 35 séries de pluies annuelles, la plus longue de 135 ans à Pouilly-en-Auxois, la plus courte celle de Montcornet, moins de 50 ans. Le travail se faisait sur des

machines électromécaniques de marque Olivetti. Dans le petit bureau aménagé rue Léon Bollée dans le pavillon en préfabriqué au milieu des bâtiments des phares et balises, cela produisait des bruits caractéristiques avec les phases d'entrées de données additionnées et celles de divisions, lesquelles en 4 saccades successives imprimaient le numérateur, le diviseur, le quotient et le reste. Le résultat de la division signifiait souvent la fin d'une longue série d'opérations : l'heure venait de la vérification des données d'entrées. Lorsqu'une erreur était détectée, et cela arrivait de temps en temps, on recommençait.

Après l'application de tests de confiance sur les résultats d'ajustement, – le test du χ^2 était le plus employé même s'il comportait sa part de subjectivité – Gauss l'emportait de peu sur Galton, avec 32 favorables sur 35 contre 30 sur 35. De fait, dans le cas des totaux annuels de précipitations, les résultats semblaient très proches. J'avais utilisé la loi de Galton, qui plaisait beaucoup à Jean Tixeront : c'était une obligation. Tixeront rappelait toujours une des propriétés de la loi de Galton : la médiane au carré est égale au produit du quantile 1 par le quantile 9, ou à celui du quantile 2 par le quantile 8. C'est très pratique d'utilisation dans le cas d'ajustements de cette loi sur les débits. La loi de Galton est ni plus ni moins que la loi de Gauss appliquée au logarithme de la variable étudiée : cette transformation de la variable devient nécessaire dans le cas des débits qui peuvent varier de 1 à plusieurs facteurs de 10. Je n'ai jamais aimé travailler sur la transformée de la variable constituée par les totaux annuels de précipitations, car l'amplitude des variations ne nécessite aucunement de les transformer, même pour le plaisir du statisticien. Je justifiai l'emploi de la loi de Gauss par le théorème central limite qui stipule qu'un échantillon de résultats – en l'occurrence la chronique des totaux annuels de précipitations en un point – dépendant d'un grand nombre de variables de même ordre de grandeur, par exemple le nombre d'épisodes pluvieux et leur diversité, suit une loi de Gauss. Durant plusieurs années, j'ai cultivé mon doute en raison du phénomène de persistance des longues périodes de sécheresse qui s'inscrit dans les chroniques et qui pouvait rendre caduc le caractère « même ordre de grandeur » des variables explicatives. A la réflexion, une sécheresse, quelle que soit sa durée, ne produit pas ou peu de précipitation et de ce fait n'entre pas dans le lot des variables produisant le total de précipitations annuelles. Cette posture se justifie pleinement dans les conditions pluviométriques du bassin Seine-Normandie. J'avoue

que si mon terrain d'étude avait été en zone aride, la justification par le théorème central limite serait devenue fallacieuse : il aurait fallu que je trouve autre chose.

Pour chacune des 35 chroniques établies par Marcel Garnier, je connaissais sa moyenne et son écart-type, les 2 paramètres qui décrivent chaque courbe d'ajustement à la loi de Gauss. L'écart-type est la racine carrée de la variance. Dans le cas de la loi de Gauss la moyenne est égale à la médiane et la distribution des valeurs de la variable est symétrique : la moyenne plus ou moins 1 écart-type englobe 66% des individus de l'échantillon, ± 2 écarts-types 95%, ± 3 écarts-types 99%. Comme les moyennes variaient de 600 mm à Paris-Montsouris à environ 1400 mm à Montsauche, au barrage du lac des Settons dans le Morvan, il y avait suffisamment d'étendue ou d'amplitude pour justifier l'emploi d'une corrélation sur les 35 couples « moyenne ; écart-type ». La corrélation obtenue naturellement était très hautement significative. La droite d'ajustement de cette corrélation passait par l'origine, sans forcer son passage, et sa pente de 0,18 correspondait au rapport de l'écart-type à la moyenne. Ce rapport n'est autre que la définition du coefficient de variation. Les 35 coefficients de variation de chacune des chroniques variaient de 0,16 à 0,21. Je me suis intéressé aux stations qui s'écartaient le plus de la droite de corrélation. Je me souviens de 2 en particulier : celle de Montcornet dans les Ardennes, qui avait un peu moins de 50 années et celle de Pouilly-en-Auxois qui rassemblait 135 ans (1831-1965). Le coefficient de variation, était de 0,16 à Montcornet et 0,21 à Pouilly en Auxois. Pour Montcornet, Marcel Garnier qui manquait de longues séries d'observation dans le Nord de la France, en particulier dans les Ardennes, m'expliqua qu'il avait eu beaucoup de difficultés à trouver une station dans cette zone perturbée par les guerres franco-allemandes. Son choix s'était porté sur Montcornet mais il avait dû effectuer de nombreuses interpolations sur les données mensuelles. Une interpolation consiste à calculer une donnée mensuelle manquante d'une chronique en utilisant les données de 2 ou 3 postes alentour. Ce genre de manipulation affecte directement la dispersion de l'échantillon et entraîne de facto une diminution de son écart-type, donc une diminution de son coefficient de variation. En revanche, dans le cas de Pouilly-en-Auxois, il n'y avait pas eu de lacunes d'observation : le poste avait été créé dès les travaux de réalisation du canal de Bourgogne et le personnel de la navigation avait effectué les observations sans interruption.

En appliquant la méthode dite des doubles cumuls entre les données de Pouilly-en-Auxois et celles des autres stations voisines (Saulieu, Liernais, Montbard), je me suis rendu compte qu'il y avait 3 ruptures importantes imputables à la seule série de Pouilly en Auxois. La raison de ces cassures m'était inconnue, parce que j'ignorais l'historique de la station. Par expérience, on sait qu'une cassure dans une chronique de données pluviométriques peut avoir au moins 2 origines différentes : l'une provenant d'un déplacement du poste pluviométrique, l'autre d'un changement de matériel, par exemple une éprouvette dont les graduations ne correspondent pas à la surface de la bague de réception du pluviomètre. Enfin une autre explication concernant la période la plus récente pourrait être la mise aux normes OMM datant des années 1930 et stipulant que la bague de réception du pluviomètre soit positionnée à 1,5 m du sol. Eugène Belgrand, après une expérimentation minutieuse, menée dans les années 1850 à Fatouville dans l'Eure, avait conclu que, sur le bassin de la Seine, la position optimale de la bague de réception devait être à 80 cm du sol : tous les pluviomètres de son réseau d'observation du bassin de la Seine furent installés selon cette règle. Or, un pluviomètre est soumis à l'influence des vents et son coefficient de captation est moindre à 1,50 m. On imagine les dégâts occasionnés par ce genre de décision sur la stabilité et l'homogénéité des chroniques, d'autant que son application a été très étalée dans le temps, au cas par cas, par les services gestionnaires.

Pour revenir à Pouilly-en-Auxois, ces 3 cassures dans la série augmentent de façon significative la dispersion autour de sa moyenne générale, se traduisant par l'accroissement de son écart-type, donc du coefficient de variation qui est le rapport écart-type sur moyenne.

Au total, j'avais une explication sur le minimum, les interpolations de données mensuelles, et une autre sur le maximum, la chronique à ruptures – ou cassures. Très vite j'admis que le coefficient de variation des pluies annuelles sur le bassin Seine-Normandie était constant à 0,18. Par la suite, je me suis préoccupé de savoir si ce rapport constant entre l'écart-type et la moyenne, à savoir le coefficient de variation, d'une chronique pluviométrique dépassait le cadre du seul bassin Seine-Normandie et de son pourtour immédiat. Je l'ai vérifié sur le Massif central en particulier sur la série de Massiac chère à Jean Tixeront. Pierre Guillot m'avait dit avoir constaté la même chose sur les zones montagneuses (Alpes, Pyrénées, Massif central) où son service hydrologique

de la Direction Technique Générale (DTG) d'EDF intervenait régulièrement, notamment pour la gestion de son réseau pluviométrique. Plus tard, dans la thèse de Mathieu sur l'eau en Franche-Comté, j'avais vu que le coefficient de variation de la pluie à Besançon était de 0,18. Même chose pour Trappes dans la thèse de Claire Figuet sur la qualité des eaux de la Mauldre.

Alors pourquoi ce coefficient de variation constant à 0,18 ? Cela est resté une énigme pour moi à ce jour. Enigme d'autant plus troublante lorsqu'on connaît les problèmes de captation de précipitations atmosphériques (pluie, neige, grêle, grésil, et les diverses formes de condensation) par les pluviomètres. En tous cas, ces bruits, très largement inférieurs à la variabilité du phénomène, ne peuvent la masquer. La zone où ce coefficient reste constant à 0,18 doit être spatialement délimitée, car par construction, en zone très aride où il pleut violemment une ou 2 fois tous les 5 ou 10 ans, ce coefficient peut grimper très largement au dessus de 1. C'est ce que Conrad, cité dans un vieux Handbook of Meteorology (celui de 1945 ?) avait déjà proposé par un graphe hyperbolique avec en ordonnées l'écart-type et en abscisse la moyenne. Je n'ai jamais vérifié ce qu'il se passait sur la totalité des terres émergées du globe, comme nous l'avions fait avec Jean-Marie Masson sur un autre sujet. Il y a là un exemple de mélange de probabilisme et de déterminisme. Serait-ce ce qu'on appelle ergodicité ? Jean-Yves Grosse m'avait taquiné une fois en disant que je croyais à l'ergodicité des pluies. Je ne lui ai jamais demandé de m'expliquer sa remarque, que j'ai prise sur le coup pour une boutade, et j'ai continué le fil de la conversation. Aujourd'hui son éclaircissement me manque. Ma consultation d'internet sur l'ergodicité ne m'apporte pas de réponse satisfaisante. Cette question reste en suspens.

Chapitre 7

Conséquences en cascade

Quelle que soit l'explication avancée, la mise en évidence de ce coefficient de variation constant sur les 35 points étudiés de la zone entraîne des conséquences en cascade.

C'est d'abord la possibilité d'étendre les résultats obtenus à l'ensemble des points de la zone. En n'importe quel point du bassin Seine-Normandie, où on peut estimer la moyenne pluviométrique annuelle grâce à la carte des « normales 1931-1960 » élaborée en 1966, on calcule son écart-type en multipliant la moyenne par 0,18. Le tableau suivant donne une idée de la variabilité des totaux pluviométriques annuels au point en question.

moyenne m	écart	intervalle à 68 %		intervalle à 95 %		intervalle à 99,7 %	
	type σ	$m - \sigma$	$m + \sigma$	$m - 2 \sigma$	$m + 2 \sigma$	$m - 3 \sigma$	$m + 3 \sigma$
520	94	426	614	332	708	238	802
600	108	492	708	384	816	276	924
700	126	544	826	448	952	322	1078
750	135	615	885	480	1020	345	1155
800	144	656	944	512	1088	368	1232
1000	180	820	1180	640	1360	460	1540
1200	216	984	1416	768	1632	552	1848
1400	252	1148	1652	896	1904	644	2156
2000	360	1640	2360	1280	2720	920	3080

De même, chaque point nouveau d'observation, créé par le réseau pluviométrique complémentaire (RPC), peut être doté a priori d'une moyenne interannuelle grâce à cette carte de référence des normales 1931-1960, puis d'un écart-type. On peut se demander à juste titre pourquoi ce RPC était indispensable ? Il apporte incontestablement une amélioration de la perception des pluies quotidiennes. Et au bout d'un certain nombre d'années d'existence, il permet aussi de vérifier le tracé des courbes de cette carte des « normales 1931-1960 ». Julien Bonnet, qui avait toujours la charge de la gestion du RPC après son transfert à la météo, m'avait signalé plusieurs endroits où il y avait des divergences avec les observations produites par le RPC. Je me souviens surtout de la vallée de la Seine dans sa partie inférieure où les valeurs affichées sur la carte semblaient légèrement exagérées.

C'est aussi la possibilité d'estimer la fréquence au dépassement d'une précipitation millésimée en un point donné. Un abaque sur papier gaussien arithmétique à l'aide d'une droite de Henry est construit avec en abscisse les rapports d'une pluie millésimée à sa moyenne et en ordonnée sa fréquence au dépassement : il s'agit d'une simple mise en forme particulière du coefficient de variation égal à 0,18. On fait le rapport du total annuel millésimé à la moyenne interannuelle, ensuite on recherche sur l'abscisse arithmétique de l'abaque la valeur de ce rapport, et grâce à la droite de Henry on détermine sur l'ordonnée gaussienne sa fréquence au dépassement. De cette manière, on va au-delà du simple rapport à la normale que la météo se contente d'indiquer, puisqu'on obtient une estimation raisonnée de la fréquence au dépassement.

La réalisation d'une carte annuelle d'iso fréquence au dépassement devient possible grâce à cet abaque qui permet pour une année donnée, de calculer les fréquences au dépassement de la pluie annuelle en chacun des points d'observation sur la zone étudiée puis de les cartographier. Ainsi, on peut dresser une carte de ces fréquences au dépassement pour l'année en question, puis tracer les courbes de fréquences égales. Dans mon rapport ronéoté de 1967, j'avais réalisé deux cartes de ce type, l'une pour 1964 l'année sèche de référence qui avait conduit à la décision de construire le barrage-réservoir Marne, l'autre pour 1965 qui à l'époque était l'année record de pluviosité à Paris.

La visualisation des années sèches et pluvieuses est réalisée en coloriant les plages intermédiaires des courbes selon une gamme allant des

couleurs les plus froides représentant les extrêmes pluvieux aux couleurs les plus chaudes exprimant les plus secs. J'ai fait cet exercice pour toutes les années allant de 1970 à 1983 sur des formats A4 qui contenaient le bassin Seine-Normandie. C'est très parlant et votre interlocuteur y consacre volontiers de son temps pour un examen de détail. La limite entre le sec et l'humide est symbolisée par la courbe iso fréquence de 50%. Comme on a fait le choix des fréquences au dépassement, on entre dans une plage jaune jusqu'à la courbe 80% qui représente les totaux annuels atteints ou dépassés quatre-vingt fois sur cent, autrement dit l'année sèche de fréquence quinquennale, soit une année sur cinq. Inversement en dessous de 50% on entre dans une plage vert clair jusqu'à la courbe 20%, qui symbolise l'année humide de fréquence quinquennale. Pour les années pluvieuses, les tonalités sont dans l'ensemble de vert à bleu foncé. Pour les années sèches, les faibles pluviosités s'expriment dans des couleurs allant du jaune au rouge orangé puis au rouge carmin pour les très sèches. En répétant ce travail pour chaque année on visualise ainsi les endroits où le phénomène a été le plus accentué, soit dans le sens d'une grande pluviosité, soit dans le sens d'une sécheresse exceptionnelle. L'exécution de ce travail montre l'apport indispensable des postes du RPC pour obtenir une idée plus fine de la pluviosité de l'année. Je me souviens de la petite zone du bief de partage du canal de la Marne à la Saône qui en 1976 avait bénéficié d'une moindre sécheresse par comparaison au reste du bassin. Pendant 1976, il n'y eut pas de chômage technique du canal pour cause de manque d'eau comme cela s'était produit en 1971 durant plusieurs mois. L'effet de la densité des postes d'observation sur ce type de carte est très parlant : j'ai fait des essais avec les seules stations officielles sur le bassin et alentour, soit un peu plus d'une vingtaine de points, puis en ajoutant les 450 postes des bénévoles du réseau météo et enfin en incorporant les 350 du RPC : les résultats plaident immanquablement en faveur de la plus grande densité. La mise côte à côte de toutes ces cartes dans un ordre chronologique montre un aspect de la traversée de la pluie sur la zone étudiée.

Imaginons que notre zone s'étende beaucoup plus loin que le seul bassin Seine-Normandie : on va peut-être s'apercevoir que le très pluvieux du départ va évoluer vers du sec, au fur et à mesure du déplacement sur la grande zone et inversement pour d'autres années.

Aujourd'hui, il me revient en mémoire le rendez-vous que j'ai eu avec Louis Serra à sa demande, en 1967. Louis Serra venait de prendre

sa retraite d'études et recherches à EDF Chatou. Il avait lu mes rapports sur les précipitations sur Seine-Normandie que lui avait transmis Joseph Jacquet pour information (pour avis ?). Je connaissais très peu de choses sur lui, sinon qu'il avait mis en place le bassin expérimental de l'Alrance en Aveyron et qu'il avait publié plusieurs articles à ce sujet dans *La Houille Blanche*. Avec moi, il n'a abordé qu'une seule question : celle des sécheresses sur l'Europe occidentale. Il avait étudié les sécheresses de 1947, de 1949, de 1964 et quelques autres, lesquelles préoccupaient beaucoup EDF pour sa gestion des équipements hydro-électriques. Il avait esquissé quelques cartes schématiques qui montraient qu'une sécheresse occupait un espace d'environ 2000 kilomètres de large et suivait une direction SSO-NNE. Au-delà de cette bande, vers l'est, la sécheresse s'estompait. Sur le coup, j'ai écouté et mémorisé, sachant que mon terrain de jeux s'arrêtait au bassin Seine-Normandie et que mon plan de travail concernait d'autres sujets plus urgents à traiter. J'y repense aujourd'hui plus de 40 années après. Et je me dis qu'il y avait là une piste de recherche intéressant l'échelle hémisphérique, pour recouper mon propos précédent, avec la difficulté toujours présente que seules les terres émergées ont fait l'objet d'observations pluviométriques au cours des deux siècles derniers.

Chapitre 8

Regard sur la variabilité des moyennes de 30 années consécutives

Il y avait un écart très important à mes yeux entre la moyenne minimale de 30 ans et la maximale à Pouilly en Auxois. De mémoire, je ne saurais le préciser. Je me souviens m'être posé la question de son amplitude : alors j'ai décidé de prendre une à une les valeurs de la chronique, de les noter chacune sur un morceau de papier et de mettre les morceaux de papier pliés dans un chapeau. Par tirage au sort effectué par une main neutre, j'ai constitué une chronique fictive de 135 années sur laquelle j'ai établi une nouvelle courbe des moyennes mobiles. J'ai répété l'opération. Au total, j'ai constitué trois courbes fictives. Je me suis aperçu que l'écart entre le minimum et le maximum était plus important pour deux des séries fictives que pour la série réelle. En un sens ça m'a rassuré. Pour approfondir cette question, en repensant à ce qu'avait présenté Vujica Yevjevich⁴³, un moyen serait de créer des séries fictives de 1 million d'années, chacune sur la base d'une moyenne prédéterminée et d'un coefficient de variation de 0,18. Avec les outils modernes, le chercheur peut s'amuser à les constituer et à s'imprégner de cet aspect. Mais dans le cas présent était-ce bien utile ? Aujourd'hui, je pense que j'aurais pu faire tout bêtement un traitement statistique de cette question, avec le calcul de l'intervalle de confiance d'une moyenne de 30 ans.

Cela m'amène au calcul de l'intervalle de confiance d'une moyenne m , effectuée sur 30 ans. On sait qu'avec une distribution normale et une estimation fiable de l'écart-type σ , on peut calculer l'intervalle de confiance de la moyenne m sur un échantillon de n individus. Dans le cas présent, ces 30 individus consécutifs sont tirés d'une chronique

43. Voir plus loin chapitre 10.

d'observation illimitée. La base de ce calcul est le rapport r de l'écart-type à la racine carrée de n , la taille de l'échantillon. L'intervalle de confiance sur m à 68% est égal à $m - r$, $m + r$; à 95% il est égal à $m - 2r$, $m + 2r$; et à 99,7% il est égal à : $m - 3r$, $m + 3r$. Comme les échantillons sont de $n = 30$ individus, la racine carrée de n est égale à 5,48. Le tableau suivant résume la grande amplitude à l'intérieur de chaque intervalle de confiance sur l'étendue des précipitations moyennes du bassin Seine-Normandie, du minimum $m = 520$ millimètres à Dreux au maximum $m = 2000$ mm sur le Haut-Follin. Rappelons que dans le tableau suivant, l'écart-type σ est égal à $0,18m$ conformément aux résultats tirés de l'étude de la variabilité des pluies annuelles du chapitre 6.

**Tableau des intervalles de confiance sur les moyennes
de trente années consécutives**

moyenne m	écart- type σ	rapport $r = \sigma/\sqrt{n}$	intervalle à 68%		intervalle à 95%		intervalle à 99,7%	
			$m - r$	$m + r$	$m - 2r$	$m + 2r$	$m - 3r$	$m + 3r$
520	94	17	503	537	486	554	469	571
600	108	20	580	620	560	640	540	660
700	126	23	677	723	654	746	631	769
750	135	25	725	775	700	800	675	825
800	144	26	774	826	748	852	722	878
1000	180	33	967	1033	934	1066	901	1099
1200	216	39	1161	1239	1122	1278	1083	1317
1400	252	46	1354	1446	1308	1492	1262	1538
2000	360	66	1934	2066	1868	2132	1802	2198

NB : $m = 520$ mm correspond à la moyenne de Dreux ; $m = 2000$ mm correspond à celle du sommet du bassin de Seine-Normandie, au Haut-Follin situé à 902 mètres d'altitude.

Ainsi, l'information obtenue des 35 chroniques établies par Marcel Garnier avait été étendue aux 450 postes pluviométriques de la Météorologie nationale, puis aux 350 points du RPC et enfin, à l'ensemble des points du bassin Seine-Normandie par l'effet de la cartographie des normales 1931-1960 et de là en courbes d'iso fréquence. Restent les problèmes d'incertitudes liés au choix de la période des normales 1931-1960

pour cartographier les pluviométries moyennes interannuelles : quelle est la représentativité de cette période ? Un premier élément de réponse est donné par la comparaison de la normale à Pouilly-en-Auxois avec ce qu'il se passe durant les 135 années de la chronique. Pour effectuer cette comparaison, j'ai établi les moyennes mobiles ou glissantes ou chevauchantes, – choisissez le terme qui vous plaira, pour moi c'est pareil –, sur la chronique. Du premier coup d'œil je me suis rendu compte que la normale 1931-1960 se situait dans une zone de moyenne générale. Ce qui fait que j'ai adopté sans états d'âme la référence des normales 1931-1960. Cependant il convient de s'interroger sur ces périodes de référence de trente ans appelées « normales » dont la finalité est de produire des totaux comparables d'un poste à l'autre et d'un pays à l'autre puisque c'est une recommandation de l'OMM. A quoi peuvent-elles servir en dehors d'une cartographie qui permet de repérer sur les terres émergées les zones de fortes précipitations et les déserts grâce aux normales annuelles et d'en décrire les variations à l'intérieur de l'année grâce aux normales mensuelles ? Avec Jean-Marie Masson, nous les avons utilisées pour montrer qu'il pleuvait plus le second semestre en hémisphère nord et inversement en hémisphère sud. On peut aussi les utiliser pour des bilans hydrologiques sur toute sorte de surface à condition de posséder sur la même période les autres données nécessaires à la confection de ces types de bilan. En fin de compte leur usage est limité.

Le danger serait de conclure comme je viens de le suggérer plus haut, qu'une « normale » pourrait être jugée représentative de la moyenne générale estimée à une station : c'est vraisemblablement très risqué, sauf en indiquant un intervalle de confiance. Ensuite la généralisation de la représentativité de cette normale à un ensemble de stations situées sur des surfaces de plus en plus grandes devient rapidement erronée. Ce ne peut être acceptable que dans certaines conditions où il y existe une bonne corrélation entre des postes proches ou subissant les mêmes événements météorologiques, mais pas au-delà. Tout cela reste subjectif.

Pour finir, on doit à nouveau se poser la question suivante : est-ce que la période 1931-1960 prise pour « normale » de référence est un bon choix ? Je ne sais pas répondre à cette question, sinon que faute de mieux on fait avec. En outre, je me pose une question subsidiaire : en admettant que ce choix est valable pour un point donné, pourquoi cette période correspondrait-elle à la « vraie » moyenne sur tous les points de la zone et au-delà ? Je n'ai pas non plus de réponse à cette question.

Chapitre 9

Impact de cette variabilité pluviométrique sur les écoulements

Les hommes savent en général assez bien gérer d'une année sur l'autre les variations des ressources en eau lorsqu'elles sont abondantes. En dehors des crues extrêmes sur de courts pas de temps qui seront abordées en seconde partie, les années consécutives de ressources déficitaires peuvent poser d'énormes difficultés d'adaptation. De surcroît personne ne sait en ce moment répondre à la question « quelles vont être les ressources des 30 prochaines années ? ». Avec les éléments obtenus précédemment sur la variabilité des totaux annuels pluviométriques, on peut essayer d'établir des ordres de grandeurs des risques encourus sur une période de trente ans consécutifs dans un avenir inconnu.

Pour réaliser cet exercice il faut commencer par rendre les unités directement comparables entre elles, celles des hydrologues de surface et celles des services qui mesurent les précipitations. Autrement dit, comment convertir l'unité du module spécifique soit un litre par seconde et par kilomètre carré, en un équivalent de millimètres de précipitations par an et par kilomètre carré. En effet les hydrologues de surface emploient volontiers le module spécifique pour indiquer qu'ils travaillent sur une durée d'observation assez longue – par exemple 30 ans –, en rapportant le débit moyen à une surface de 1 kilomètre carré dans le but de réaliser des comparaisons directes d'un bassin versant à l'autre. Notre problème immédiat est d'effectuer cette conversion en millimètres de pluie annuelle. Dans l'année de 365 jours il y a 31 536 000 secondes. Un litre par seconde et par kilomètre carré correspond à la lame d'eau écoulée annuelle égale au nombre de secondes dans l'année, soit 31 536 000 litres ou 31 536 mètres cubes, divisé par

une surface de 1 000 000 mètres carrés. Donc un litre par seconde, sur un kilomètre carré équivaut à une lame d'eau annuelle de 0,0315 mètre ou 31,5 millimètres par an, écoulée à l'exutoire du bassin versant.

De mémoire les modules spécifiques du bassin Seine-Normandie estimés dans les années 1970, varient de 4 l/s/km² pour certains cours d'eau de la Beauce à plus de 25 l/s/km² pour les petits bassins versants situés sur le haut Morvan, sous affluents de l'Yonne et orientés à l'ouest. Cela correspond à l'amplitude des pluviométries moyennes annuelles du tableau précédent du chapitre 8 soit 520 mm à Dreux et 2000 mm sur le Haut Follin.

Maintenant, intéressons nous à la colonne du tableau du chapitre 8 précédent, relative à la branche basse de la fourchette à 95%. Il y a une chance sur vingt pour que la moyenne pluviométrique annuelle sur 30 ans consécutifs perde 34 mm à Dreux et 132 mm sur le Haut Follin. Soit un déficit équivalent à environ 1 l/s/km² pour les cours d'eau de la Beauce et à 4 l/s/km² sur les petits bassins versants du haut Morvan. C'est considérable et on imagine mal les répercussions sur les biotopes et sur les usages de l'eau. Bien sûr, certains ergoteront en disant que c'est un problème complexe et qu'on ne peut soustraire directement cette quantité des volumes écoulés : il ne s'agit que d'ordres de grandeur destinés à attirer l'attention de tous et particulièrement celle des responsables. De surcroît, il est permis de songer à des situations bien plus tendues en exploitant la colonne des 99,7% du tableau cité. D'autant que les usages évoluent dans le temps et provoquent en retour une instabilité plus forte des ressources existantes.

Prenons le débit moyen de la Seine à Paris : de mémoire dans les années 1970, il était de 220 mètres cube par seconde au pont d'Austerlitz, pour une surface totale du bassin de 42 000 km², toujours de mémoire. Ce qui fait un module spécifique équivalent à 165 mm écoulé par an. Admettons que la pluviométrie moyenne annuelle se situe entre 750 et 800 mm sur le bassin⁴⁴. Envisageons les deux exemples suivants.

- Le cas d'une année sèche particulière. Partons du cas de 1921, où la sécheresse était plus que centennale (273 mm à Paris-Montsouris).

44. La pluviométrie moyenne 1931-1960 sur le bassin de la Seine à Paris au pont d'Austerlitz a été calculée par planimétrie des intervalles de courbes grâce à A. Chouraqui. Ces résultats, comme ceux de tous les bassins disposant d'une station de jaugeage, sont consignés dans le 3^{ème} fascicule des cahiers techniques n°2 de Seine Normandie, cahiers consacrés à l'hydro climatologie. Mais j'ai perdu la mémoire de ces résultats.

La sécheresse centennale correspondant à la moyenne de 750 à 800 mm est d'environ 350 mm pour l'ensemble du bassin amont de Paris (se reporter au tableau du chapitre 7). A combien s'est élevé le débit moyen de la Seine à Paris en 1921 ? Qui peut répondre à cette question ? Pas moi. J'ajoute que les usages de l'eau étaient bien différents de ceux d'aujourd'hui et que la population encore très rurale au sortir de la Grande Guerre était suffisamment endurcie pour affronter les conséquences de cette sécheresse.

- Le cas d'une période de 30 années consécutives. Reportons-nous au tableau précédent du chapitre 8, sur les lignes 750 et 800 mm qui correspondent aux moyennes établies sur 30 ans. On y voit que dans la fourchette de confiance à 95% qui traduit les risques sec et humide une fois sur vingt, ce nombre fluctue de 100 mm : cela signifie que le module spécifique mesuré sur 30 ans consécutifs peut varier de cent millimètres – soit un peu plus de 3 l/s/km² –, sur une période d'observation assez courte, disons un peu plus d'un siècle, ce qui traduit un risque très important, même à l'échelle d'une vie humaine. Par comparaison, l'ensemble des barrages réservoirs construits à l'amont de Paris peuvent fournir un soutien d'étiage de 2 l/s/km² à condition d'être remplis entièrement avant la période du lâcher.

Le bassin Seine-Normandie se situe dans une zone climatique tempérée. Pourtant, il n'est pas besoin d'invoquer un hypothétique réchauffement climatique pour envisager des scénarios catastrophes tout à fait plausibles et fort probables. Pour corroborer ce qui précède, je me souviens que, lorsque qu'on calculait les probabilités de remplissage d'un barrage-réservoir⁴⁵ une fois que sa capacité totale avait été décidée, le résultat variait de 8 années sur 10 lors du calcul de projet initial au cours des années 50, à plus de 9 années sur 10 lors de la période d'observation ultérieure après la première mise en eau, et cela avec le même règlement d'eau définissant la gestion du barrage-réservoir, toutes choses étant égales par ailleurs, pour reprendre l'expression consacrée. Seule la période d'observation avait changé. Voilà qui promet des surprises certaines dans un avenir plus ou moins lointain.

Comment visualiser le risque en le cartographiant ? Maintenant, je repense à la carte des modules spécifiques en courbes iso valeur que

45. Je crois que c'était celui de la Forêt d'Orient, alias le barrage-réservoir Seine.

j'avais réalisée pour la partie hydrologique de l'atlas de la monographie du bassin Seine-Normandie. Nous en avons discuté avec Jean Tixeront et nous étions convenus qu'une carte classique des stations de jaugeage affichant les débits réels serait illisible et sans grand intérêt, d'autant que les 180 nouvelles stations créées par les SRAE avaient moins de 5 ans d'existence. Aussi j'avais réalisé à l'estime une carte en courbes d'égales valeurs, exprimées en litres par seconde et par kilomètre carré, en référence directe à la carte pluviométrique des normales 1931-1960 et aux données de débits disponibles. Aujourd'hui je prendrais le parti de compléter cette carte pluviométrique 1931-1960 par deux nouvelles traduisant l'intervalle de confiance à 95% indiqué au tableau du chapitre 8.

- L'une correspondant à la colonne $m - 2r$ du tableau ;
- L'autre correspondant à la colonne $m + 2r$ du tableau.

Les bornes de cet intervalle de confiance sont loin de traduire des situations extrêmes : ce sont des exemples pour indiquer des ordres de grandeur. Sur la première carte, je transformerais l'isohyète 750 mm de la carte 1931-1960 en isohyète 700 mm et sur la seconde en isohyète 800 mm et ainsi de suite pour toutes les autres courbes. Puis je construirais les 2 cartes de courbes d'égales valeurs de modules spécifiques en l/s/km² en les déduisant de ces nouvelles références pluviométriques, toujours à l'estime. De cette manière, j'attirerais l'attention des responsables sur les risques encourus de raréfaction de la ressource en eau sur le long terme sans avoir recours au discours actuel et dominant sur le changement climatique, mais sans savoir à quelle époque cela se produirait : il ne s'agit que d'une probabilité forte, dont peuvent s'accommoder les esprits fatalistes.

Ici, nous rejoignons le dilemme évoqué à maintes reprises en particulier au chapitre 10, entre probabilisme et déterminisme.

- d'une part, à partir de faits constatés dans les chroniques pluviométriques, nous pouvons faire intervenir les lois de la statistique et indiquer des probabilités d'occurrence d'une sécheresse.
- d'autre part, en faisant l'hypothèse d'une tendance au réchauffement climatique, nous nous enfermons dans un raisonnement déterministe faisant appel à des hypothèses en cascade et non vérifiables pour la

plupart, pour évaluer les effets de ladite tendance sur le cycle de l'eau et éventuellement sur les précipitations au ras du globe. Comme la tendance liée à l'hypothèse de l'effet de serre est inscrite dans le raisonnement du départ, il devient impossible d'en extraire la partie aléatoire, pourtant de loin la plus importante et qui nous intéresse le plus pour prendre des décisions. En résumé, il vaut mieux faire des probabilités avec des mesures même médiocres que faire des calculs excellents sans mesures du tout.

La prise en compte des totaux pluviométriques annuels semble essentielle pour estimer la gravité des risques de sécheresse, quelle que soit la répartition des pluies au cours de l'année. Des différences de répartition en cours d'année d'un même total pluviométrique peuvent entraîner des résultats fort divers sur la production agricole et sur le stockage de l'eau dans les nappes, mais cela ne change rien au fait qu'il y aura insuffisance globale de la ressource en eau. Surtout si, par malheur, les années sèches se suivent.

Chapitre 10

Les débats à la SHF en 1967

Avant la seconde guerre mondiale, il y eut en France une grande activité dans le domaine de l'hydrologie appliquée, principalement autour de la société hydrotechnique de France -SHF-. On retiendra, entre autres, les noms de Coutagne et sa formule de déficit d'écoulement, de Caquot et sa circulaire pour concevoir les réseaux d'évacuation d'eaux pluviales, de Gumbel et de Fréchet pour estimer les probabilités des grandes crues. Les recherches universitaires étaient surtout le fait de géographes au premier rang desquels il y avait Pardé, et des géologues. Après-guerre, il y eut en 1948 la création du Prix Henri Milon d'hydrologie au sein de la SHF, laquelle était financée principalement par EDF, entreprise récemment nationalisée et qui se montra très active en hydrologie. Les études et recherches d'EDF se sont intéressées à la pluie artificielle par insémination d'iodure d'argent dans la masse nuageuse : les sécheresses de 1945, 1947 et 1949, avec le risque d'un remplissage insuffisant des lacs de barrage existants ou en cours de réalisation, étaient devenues un sujet important pour les études et recherches de Chatou. Les résultats s'avérèrent négatifs. Gaston Réménieras publiait *Hydrologie de l'ingénieur*. J. Bernier développait son cours de statistique sur la décision en avenir incertain en s'appuyant sur les travaux de Bayes. Une autre équipe d'EDF, celle de la division technique générale à Grenoble, sous la direction de Jean Lugiez, faisait faire de substantiels progrès dans 3 directions :

- en hydrométrie, notamment dans les jaugeages chimiques des écoulements torrentiels (Audinet, Richer, Mazerand) ;
- la mise en place d'un réseau d'observation hydrométrique, pluviométrique et nivométrique couplé à un service de prévision

hydrométéorologique pour la gestion des barrages et très vite pour l'ensemble du parc de production hydroélectrique ;

- la publication de la méthode du gradex par Pierre Guillot et Daniel Duband, destinée au calcul de probabilité des crues extrêmes à partir des données de débits, mais aussi et surtout des données pluviométriques.

Il y avait ceux, beaucoup moins nombreux, qui avaient été confrontés à l'annonce d'une très grande crue, et que cela avait conduit à chercher des techniques nouvelles pour en fiabiliser la prévision. C'est ainsi que les crues de la Vézère et de la Truyère avaient conduit Claude Fabret, responsable de l'annonce des crues à installer un ancien radar de la Marine nationale à Greizes en Dordogne pour gagner quelques heures dans la prévision du phénomène. Les circonscriptions électriques, dépendant du ministère de l'Industrie, étaient chargées des stations de jaugeage sur les fleuves et cours d'eau soumis à la police des eaux du ministère de l'Équipement – on imagine à peine la confusion institutionnelle dans le domaine⁴⁶ –. Elles ont apporté leur contribution en hydro-métrie, avec notamment André Goubet pour le mesurage des débits des cours d'eau envahis par la végétation aquatique à l'étiage.

De leur côté, les hydrologues de l'ORSTOM, sous l'impulsion de Marcel Roche, auteur d'une récente « *Hydrologie de surface* », et du géographe Jean Rodier qui avait animé avec Francou un recueil des plus grandes crues observées dans le monde, complétant ainsi le travail entrepris naguère par Maurice Pardé, ont apporté une grande contribution à la connaissance des ressources en eau des pays en cours de décolonisation. De même pour les hydrogéologues du BRGM, en relation avec la recherche universitaire à Paris, Bordeaux, Montpellier et ailleurs en province et dans les ex-colonies. Il y avait à cette époque une très brillante école française, avec les Castany, Margat, Glangeaud, Schoeller, Berkaloef etc. En 1967, l'équipe qui m'avait accueilli en 1963 au CERGR de Tunis fut rapatriée à Montpellier et constitua une équipe de recherche hydrologique au sein du laboratoire d'hydro géologie du professeur Avias. L'ossature de cette équipe était constituée

46. Je me souviens de ma brève rencontre à Helsinki avec John Rodda, alors en fonction à l'OMM, qui m'avait dit envier l'organisation éparpillée à la française en hydro climatologie, car elle permettait la créativité que ne pouvait plus avoir le Royaume-Uni, trop enfermé dans ses rigidités institutionnelles ! C'était en 1981.

d'Yves Cormary, d'André Lobert et de Jean Marie Masson à laquelle vinrent se joindre d'autres en provenance d'EDF ; elle vivait de crédits de la DGRST⁴⁷ et de contrats divers, notamment avec l'agence de bassin Seine-Normandie. Plus tard, cette équipe fut dissoute parce que l'université qui l'abritait lui reprochait de faire de la recherche appliquée !

Les représentants de la direction de l'hydraulique du ministère de l'Agriculture étaient occupés à construire les réseaux hydrométriques de leurs services régionaux d'aménagement des eaux, avec l'appui de l'ORSTOM. Ceux de l'INRA, préoccupés par les rendements des végétaux, ne venaient pas à la commission des débits où l'évapotranspiration n'était pas au centre des débats.

Un autre fait marquant de cette période fut la publication de la thèse annexe d'Emmanuel Leroy-Ladurie sur « *le Climat de la France depuis l'an mil* ».

Autant dire qu'en 1967 il y avait un foisonnement d'expériences et des débats passionnants, dont la Société Hydrotechnique de France fut la principale caisse de résonance : l'époque était à qui apporterait sa contribution à l'établissement d'une relation fiable entre les pluies et les débits. Les affrontements entre déterministes et probabilistes étaient souvent assez tendus et j'étais déjà assez tenté par une vision mélangeant ces deux approches. Dans la catégorie des déterministes, il y avait principalement ceux qui étaient préoccupés par la prévision et l'annonce des crues. Parmi eux, certains promouvaient la création de relations pluies débits. Dans celle des probabilistes, le sujet principal était la détermination de la crue de projet : la décennale pour les barrages. La décennale pour l'assainissement pluvial des zones habitées était considérée comme connue depuis l'avant-guerre et avait fait l'objet de la circulaire Caquot, du nom de son principal auteur au ministère de l'Equipeement. Tout ce mouvement était concomitant de ce qu'il se passait aux Etats-Unis. Les sessions de la commission des débits s'estompèrent faute d'éléments nouveaux de discussion. Avant qu'elles ne s'arrêtent définitivement, un des moments forts eut lieu en 1967 avec la venue de Vujica Yevjevich pour une série de conférences.

47. Je vous recommande de consulter l'atlas hydrologique du bassin de l'Allier, ouvrage remarquable pour l'époque, financé et publié sous les auspices de la DGRST.

Vujica Yevjevich avait fait ses études en Yougoslavie et les prolongea près de deux années à Grenoble juste avant la seconde guerre mondiale. Il regagna son pays, où il dirigea d'importants travaux de construction d'ouvrages hydrauliques tout en prodiguant un enseignement supérieur. Il prit une dimension internationale et s'installa aux Etats-Unis, où il enseigna l'hydrologie à l'université de Colorado Springs. Yevjevich avait gardé des liens avec la France. Il parlait parfaitement notre langue. Il donna ses conférences notamment à la Sorbonne et à Polytechnique. Cormary me convainquit d'y assister. Le thème principal tournait autour des probabilités d'occurrence de phénomènes discrets, de l'échantillonnage et des méthodes de simulation de type Monte-Carlo. A partir d'un phénomène constaté, à savoir une corrélation négative hautement significative entre les précipitations et les températures d'été au Nord Canada – autrement dit, plus il pleut en été plus les températures d'été sont basses –, Yevjevich se lançait dans l'estimation de la probabilité d'occurrence d'une série d'années consécutives avec de fortes précipitations estivales pour calculer le risque d'une avancée des glaciers⁴⁸ de plusieurs dizaines de kilomètres dans l'extrême Nord canadien. Serait-il encore possible aujourd'hui d'assister à pareille conférence ?

Un autre exercice qui m'avait fasciné était la création d'une série fictive d'un million d'années de précipitations annuelles suivant une loi de probabilité de Gauss (donc avec une moyenne et un écart-type définis *a priori*) et la réalisation d'échantillons de 50, 100, 500 et 1000 ans tirés à l'aide d'une méthode de Monte-Carlo. La comparaison d'une loi de Gauss ajustée aux échantillons avec la loi de départ – celle qui avait généré la population de 1 million d'individus – montrait que les valeurs centrales des échantillons étaient d'autant mieux connues que l'échantillon comportait un grand nombre d'individus : c'était heureusement conforme à notre attente. Mais deux choses m'avaient intrigué. D'une part, sur un échantillon donné, de 50, 100 ou 500 individus, il y avait seulement les données centrales qui collaient parfaitement à la courbe d'origine : cela veut dire que sous des conditions requises de pertinence du choix de la loi d'ajustement, on connaît bien les probabilités d'occurrence des valeurs centrales pour une moitié de l'échantillon, pas au delà. D'autre part les valeurs extrêmes s'écartaient toutes de la même façon de la droite d'origine, à partir d'une sorte de coude. Y avait-il

48. Autres temps, autres mœurs : c'était à l'opposé du discours dominant aujourd'hui !

un biais provoqué par la méthode d'échantillonnage ? Je n'ai jamais su ce qu'il en était, mais cela m'intrigue à nouveau en y repensant aujourd'hui, plus de 45 ans après. S'agissait-il d'un effet analogue à celui de Zipf que Benoît Mandelbrot parvint à expliquer comme un cas particulier de son ensemble ? La loi des grands nombres apparemment domptée par Yevjevich produisait un autre type de hasard. Bizarre !

C'est parce que je n'avais pas les outils de Yevjevich pour générer une série que j'avais bricolé de la façon indiquée plus haut avec les 135 valeurs de la série la plus longue à ma disposition, celles de Pouilly-en-Auxois. Lors des conférences de Yevjevich, je m'abstins d'intervenir par grande timidité et par peur de me voir pris à parti sur mon manque tragique de connaissances en matière de probabilités. J'avais déjà été témoin de tentatives de déstabilisation par une simple interpellation sur un micro-détail, l'intervenant se posant ainsi en expert de la question en vous réduisant à l'état de nullité. Et pourtant, j'avais quelques éléments probants dans mes poches dont ce coefficient de variation constant à 0,18 qui, tout en décrivant une loi de probabilité, appartiendrait au déterminisme, puisqu'on le retrouve sur une zone dépassant le seul cadre de Seine-Normandie dont j'ignore encore l'étendue totale et ses contours.

Chapitre 11

Un besoin double : l'accès aux données quotidiennes et l'échange sur les études réalisées

Le début d'une banque de données pluviométriques

Le problème était le suivant : étant donné d'une part la grande disparité des publications de données quotidiennes au fil du temps avec des lacunes plus ou moins importantes et d'autres part l'énorme gisement des manuscrits entreposés au Fort Saint-Cyr, ne valait-il pas mieux effectuer la mise sur support informatique directement à partir des archives manuscrites ? Etudier ce qu'il se passe entre le document de première main établi par l'observateur et le document publié est certes intéressant. C'est chose possible lorsqu'on possède les deux. Mais c'est un travail quasi infernal et insurmontable. Et pour quel gain ? Nul ne le sait vraiment. Je me suis dit qu'il valait mieux ignorer les données quotidiennes publiées et recourir directement aux relevés des observateurs pour les mettre directement sur cartes perforées afin d'en garantir à tout instant les réutilisations. C'était un pari fou et dangereux. Je suis amené à faire digression avec l'énorme travail de constitution des fichiers informatisés de données pluviométriques quotidiennes à partir des archives manuscrites des observateurs, stockées dans les caves du Fort Saint-Cyr qui hébergeait encore l'école de la météorologie avant son transfert à Toulouse. Les chemises de dossiers étaient couvertes de salpêtre. J'avais obtenu l'autorisation de Raymond Arléry en 1967, au cours d'une réunion du bureau d'études permanent (BEP) alors dirigé par Claude Lefrou, qui succéda par la suite à François Valiron à la tête de l'agence. Le monde français de l'eau est petit ! Comme j'insistais

pour avoir accès aux archives et qu'Arléry n'y était pas vraiment disposé, Pierre Guillot est intervenu d'une façon caustique comme il en avait le secret : « laissez le faire, quand il aura le nez dans les archives il ne vous importunera plus », qui fit rire tout le monde et l'affaire fut conclue. Tout ce travail a été décrit dans le premier fascicule des cahiers techniques n° 2 publiés par l'agence vers 1972. Je n'y reviendrai pas dans le détail.

Je rappelle simplement la quantité de plus de 20 000 stations années de données quotidiennes pluviométriques mises sur cartes perforées : c'est le côté fou de l'opération menée au sein d'un organisme, l'agence financière de bassin Seine-Normandie, dont ce n'est pas la vocation. La saisie des données anciennes depuis 1876 a concerné principalement la zone est et sud-est du bassin, là où il y avait de nombreux sites potentiels de barrages-réservoirs, en particulier le bassin de l'Yonne, mais aussi l'amont des bassins de l'Aube de la Marne et de l'Oise. L'objectif était de se procurer les moyens d'estimer les apports, de pouvoir faire des simulations pour gérer le réservoir et pour dimensionner le barrage et son évacuateur de crues. Il est utile de rappeler un aspect de l'hydro schizophrénie de l'époque : comme l'Etat était chargé de la sécurité des personnes et des biens, lui seul pouvait financer la lutte contre les inondations, et à ce titre les études concernant la prévention des crues relevait de son apanage. L'agence devait se préoccuper de financer l'amélioration de la ressource en quantité et en qualité. Le financement d'un barrage-réservoir, outre celui de la maîtrise d'ouvrage qui était assurée par une collectivité⁴⁹, était complété par l'Etat au titre de la protection contre les crues et par l'agence au titre du soutien d'étiage. En principe, l'agence n'avait pas à financer des études sur les crues. Mais comment assurer le remplissage d'un réservoir sans prendre en compte le volume des crues ?

Le côté dangereux résidait dans la foi portée sur les relations pluie débits. J'y reviendrai dans la deuxième partie consacrée à l'hydrologie. Fort heureusement, nous avons accès aux relevés d'observation des échelles limnimétriques archivés par le service d'annonce des crues. Ces relevés firent l'objet d'une saisie sur cartes perforées, opération engagée par mon collègue Tien Duc. Les échelles avaient été mises en place sur le bassin de la Seine par Belgrand au début des années

49. Dans notre cas, c'est l'institution des barrages-réservoirs de la Seine, formée des 4 départements issus de l'ancien département de la Seine, à savoir Paris, les Hauts-de-Seine, le Val-de-Marne et Seine-Saint-Denis.

1850. Nous n'avons retrouvé que les données archivées à partir de 1876 dans le service de la navigation de la Seine. On sait que les archives du début ont été brûlées dans l'incendie de l'Hôtel de Ville en mai 1871, mais je n'ai pas trouvé trace de la période intermédiaire comme pour les données pluviométriques. Encore un effet de l'organisation hydro schizophrénique post-Second Empire : d'un côté les pluies et de l'autre l'hydrométrie des cours d'eau. Ce sont surtout les données des échelles limnimétriques qui nous ont permis de reconstituer des chroniques fiables de débits et non la pluviométrie.

Les opérations de saisie de la pluviométrie comportaient en gros les phases suivantes :

1. retrait des archives du Fort Saint-Cyr, toutes les années d'une même station à partir de 1876 ;
2. report sur un bordereau de perforation des observations d'une année avec les identifiants (n° INSEE de la commune, année d'observation). Le bordereau comporte 12 colonnes correspondant aux 12 mois et 32 lignes correspondant aux 31 jours des mois les plus longs et la 32^{ème} ligne étant le total de chaque mois effectué à la calculette. Cette opération, qui était la plus lourde en temps de travail, a été confiée à des personnes extérieures à l'agence, par exemple des étudiants ;
3. vérification des identifiants, et appréciation visuelle de l'ensemble, puis envoi au pool de perforation ;
4. chaque paquet de 32 cartes fait l'objet d'une vérification à la mécanique avec un programme approprié, puis de l'édition d'un listing ;
5. correction des erreurs de bordereau ou de saisie selon les résultats du listing ;
6. rangement des cartes perforées dans des boîtes ad hoc en carton par station, les années se suivant dans l'ordre chronologique ;
7. retour des archives au Fort Saint-Cyr.

Les cartes perforées étaient ensuite envoyées au laboratoire d'hydrologie de Montpellier où se sont retrouvés les ingénieurs⁵⁰ que j'avais

50. Yves Cormary, André Lobert et Jean Marie Masson.

connus au CERGR de Tunis. Le laboratoire procédait à un transfert sur bandes magnétiques puis à des études sur la pluie, en partie financées par l'agence. Ils firent plusieurs recherches en appliquant la théorie du renouvellement qui était apparue en 1965 et en procédant à de nombreux ajustements à toutes sortes de lois de probabilités pour décrire les populations de pluies quotidiennes à partir des échantillons constitués dans les fichiers numérisés. Des essais de relations pluies débits eurent lieu un peu après, principalement au droit de stations de jaugeage, notamment sur le bassin de l'Oise puis sur le bassin de la Seine à l'occasion des études d'amélioration de la gestion du barrage-réservoir Seine (autrement dit le lac de la forêt d'Orient). C'est en utilisant les données qu'on s'aperçoit des erreurs de saisie. D'après les spécialistes, nos fichiers étaient jugés propres, compte tenu du faible nombre d'erreurs recensées. Il n'empêche que ces erreurs existaient et polluaient les fichiers. Il en restait beaucoup trop à mon goût. Les cartes perforées nous étaient retournées et nous les stockions dans les caves de nos locaux loués rue de Javel dans le 15^{ème}. Je me souviens de la crainte que j'éprouvais vis-à-vis du stockage magnétique sur bande : était-ce vraiment sûr ? De surcroît, une carte perforée est une chose tangible et on peut savoir ce qu'elle contient quand on connaît son format de saisie. Ce n'est pas le cas de la bande magnétique. Deux précautions valant mieux qu'une, je décidai d'archiver les bordereaux de saisie ailleurs. Au total, ce sont près de 700 000 cartes perforées qui furent stockées. Sachant qu'un bac n'en contenait que 2 500, vous pouvez imaginer le volume des armoires métalliques. Cette affaire eut un dénouement en juillet 1972, lorsque les caves furent inondées après deux orages successifs : Eugène Belgrand n'avait pas réalisé l'assainissement du 15^{ème} arrondissement, qui à son époque était entièrement rural, avec même des vignes à Grenelle. Tout ce travail se trouva jeté à la décharge : heureusement qu'il y avait les bandes magnétiques !

En 1968, en même temps qu'il décida la création du réseau pluviométrique complémentaire (RPC), Valiron me chargea d'étudier et de mettre en place un « bureau de l'eau » au sein de la Météorologie nationale ; de son côté, il en parlerait à ses collègues directeurs pour que le financement en soit assuré par les 6 agences financières de bassin. Cette opération débuta assez rapidement à la division climatologie de la Météorologie nationale, en particulier grâce à son responsable, Raymond Arléry avec qui j'avais un bon contact. Le bureau de l'eau

avait pour mission de faciliter l'accès aux données nécessaires à l'activité des agences et aux maîtres d'ouvrages qu'elles finançaient. Les données pluviométriques étaient directement visées et l'activité de ce bureau fut presque entièrement dévolue à ce domaine : constituer des chroniques homogènes de données quotidiennes critiquées. Au cours des discussions que nous eûmes en 1969-1970 entre représentants des agences financières de bassin, j'affichais mon désaccord sur le fait de critiquer les données, ce qui équivalait à intervenir sur les relevés effectués par les observateurs pour carrément les modifier, pratique devenue courante au sein de la Météorologie nationale. Le fait d'avoir mis sur pied la banque pluviométrique de Seine-Normandie et surtout d'avoir réfléchi au mode de fonctionnement du RPC, ce que mes collègues des autres agences n'avaient pas expérimenté, dressait une barrière entre nous. Je ne voulais pas leur imposer mon point de vue, d'autant que mes doutes croissaient sur l'efficacité des relations pluies débits, et surtout je ne voulais pas saper l'idée de Valiron du financement, par les agences, de la mise à disposition des données climatologiques. Le lien était créé et il s'agissait de progresser.

En 1983, Pierre Alain Roche, qui était devenu sous-directeur au ministère de l'Environnement, fit le projet d'unifier les systèmes informatisés des différents services produisant les données hydrométriques des rivières. Il chargea Jean-Louis Dutillet, qui avait organisé avec succès le système ARHMA au sein de la direction de l'hydraulique du ministère de l'Agriculture, tutelle des SRAE, de présider le groupe de travail qui donna naissance à la banque HYDRO. Parallèlement, il me demanda de présider un groupe pour décider de la création de la « banque pluviométrique ». Il y avait deux problèmes à affronter : l'un technique concernait les données pluviographiques auquel Jacques Guiscaffré de l'IRD contribua pleinement du fait de sa connaissance du terrain dans les Antilles et des acquis au sein de l'ORSTOM ; l'autre relevait purement de la politique boutiquière des services de l'Etat, la direction de la Météorologie nationale avançant à reculons sur le sujet. Les conclusions du groupe de travail furent déposées en faveur de la création de la banque pluviométrique sous la maîtrise d'œuvre de la météo. La banque mit plusieurs années pour commencer à se créer. En outre, il y avait un problème urgent à régler du fait du transfert de l'école de la météorologie à Toulouse. En effet, l'école occupait les locaux du Fort Saint-Cyr dans les caves desquels étaient entreposées les

archives pluviométriques. Avec Pierre Alain Roche et Philippe Boiret, qui dirigeait le bureau de l'eau, nous contactâmes les Archives nationales et finalement décidâmes de transférer ces archives dans les locaux des Archives nationales de Fontainebleau. Philippe Boiret s'occupa du côté pratique du transfert. A côté des archives pluviométriques étaient stockées des archives phénologiques, observations naturalistes de la vie animale et végétale effectuées principalement dans les maisons forestières. Pourquoi se trouvaient-elles au Fort Saint Cyr, je ne le sais pas. Elles firent partie du voyage à Fontainebleau. Depuis cette date, je suis resté sans nouvelles de leur devenir.

Lorsque la banque pluviométrique vit le jour, la direction de la météo contaminée par le libéralisme triomphant en général et à Bercy en particulier, décida de vendre les données à qui en avait besoin. Quand je compare avec les règles en vigueur aux Etats Unis, où les données produites par les agences fédérales sont obligatoirement mises à disposition gratuitement, je me mets à rêver. Et si c'était à refaire, comment m'y prendrai-je maintenant ? Les outils modernes offrent des possibilités incomparables. A mon sens, l'une des tâches primordiales serait de scanner les archives de première main des observateurs et de les mettre à disposition de tout le monde par internet. L'établissement public dont le fonctionnement est payé par le contribuable devrait en outre constituer différents produits, en priorité les fichiers de données numérisées analogues à ceux que nous avons fait dès 1967. L'utilisateur qui aurait à sa disposition les deux sources pourrait faire son travail en toute connaissance de cause.

La section pluviométrie de la SHF

Fin 1971, Jean Rodier de la direction de l'ORSTOM me contacta. Il était membre du bureau de la Société Hydrotechnique de France et à ce titre avait été mandaté pour créer une section « pluviométrie » à la SHF et trouver quelqu'un pour l'animer. Il me convainquit d'accepter. Après plusieurs réunions informelles, un groupe fut constitué où les volontaires venaient d'horizons différents. Au début, il n'y eut aucun représentant de la météo. Ce n'était pas faute d'avoir sollicité la direction par le truchement de la commission hydrologie du conseil supérieur de la météorologie, où je siégeais à la demande de son président Estienne. Il

fut décidé un premier colloque entre nous en 1976, puis un second en 1979. Ces mini-colloques s'étaient réalisés hors des sessions du comité technique de la SHF et de ce fait ne pouvaient faire l'objet d'une publication dans la revue *La Houille Blanche*. J'avais conscience qu'il n'était pas suffisant de débattre entre nous et qu'il fallait faire connaître ces travaux à l'extérieur. En septembre 1979, un séminaire fut organisé à Trégastel sur la télédétection. Gérard Saint du CNES, Pierre Clergeot de l'université Paris-Tolbiac et moi y présentâmes notre travail sur la télédétection des surfaces irriguées sur le bassin de la Seine. L'établissement des études et recherches de la météorologie était le principal organisateur de ce colloque. Au cours d'une interruption de séance, je demandai à son directeur Adelin Villevieille si les textes sur les précipitations pouvaient intéresser la revue *La Météorologie*, dont il était aussi le directeur. L'entrevue dura moins d'une minute. Il donna tout de suite son accord de principe et m'indiqua les personnes qu'il me fallait contacter. A ma question sur la soumission des textes à un comité de lecture, il me répondit qu'il ne voulait surtout pas ce genre d'intrusion qui aboutissait à la mise à l'écart de textes pouvant devenir d'actualité plusieurs années plus tard. J'en suis resté bouche bée. Avec le recul et le climat de pensée conformiste qui règne aujourd'hui, je lui sais gré de sa position qui m'a ouvert définitivement les yeux. Le numéro spécial de la revue parut en 1980. J'avais persuadé ceux qui n'avaient pas rédigé entièrement leur communication de le faire : beaucoup s'étaient contentés de notes manuscrites pour leur communication orale. La plupart étaient des ingénieurs et techniciens peu habitués aux pratiques de la publication. J'ai relu minutieusement leurs articles et leur ai demandé des compléments et des corrections. La seule communication rendue incompréhensible par endroits fut mon avant-propos : se relire soi-même comporte le danger du manque suffisant de recul. Il faut toujours faire appel à un point de vue extérieur.

Au sein du comité technique de la SHF, la section pluviométrie avait acquis une renommée suffisante et il fut décidé la tenue au printemps 1981 d'une première session consacrée aux précipitations. L'appel à communication a permis d'élargir sensiblement l'audience. Une seconde session du comité technique eut lieu au printemps 1983 sur le thème « radars et précipitations ». J'ai organisé un dernier colloque interne à la section pluviométrie au printemps 1984 : les communications firent l'objet d'un document interne ronéoté et distribué

aux seuls participants. Durant les sessions ouvertes et les colloques internes, je me suis astreint à exercer uniquement mon rôle d'organisateur et d'animateur. Quelquefois, il y avait la présentation d'un travail auquel j'avais participé, mais je n'ai jamais fait une communication ou une intervention à titre personnel. En 1986, j'avais organisé une session sur le thème des mesures en rivière et en réseau d'assainissement pour jeter une passerelle entre deux mondes qui s'ignoraient, bien que leurs préoccupations fussent proches. Là, j'avais présenté deux communications collectives. Auparavant, j'avais conçu le programme des journées de l'hydraulique de cette même année : il concernait l'influence des activités humaines sur le régime des eaux. Un désaccord était apparu avec mes collègues du bureau du comité technique sur la dévolution des cinq rapports introductifs de chacun des thèmes. De mon point de vue, il était impératif de sortir de la routine de la répartition entre ingénieurs des différents corps techniques de l'Etat, par exemple un ingénieur des Ponts et chaussées pour les agglomérations et un ingénieur du Génie rural pour les zones agricoles, fussent-ils en chef ou généraux. Je voulais faire appel à des universitaires et à des associatifs pour pimenter les débats. Pire, on me demanda d'être le secrétaire de la session consacrée à l'hydrologie urbaine dont le rapporteur désigné par eux était mon directeur d'agence. Je refusai et n'assistai pas aux journées. Je me retirai de mes activités à la SHF, d'autant plus qu'un gros projet m'attendait au niveau national, celui des banques de données sur l'eau. Je ne gardai que ma participation au jury du prix d'hydrologie Henri Milon. Cela dit, je conserve un excellent souvenir de tous ceux qui consacraient bénévolement une partie de leur temps libre à la SHF. Je ne peux tous les citer, mais je fais une mention particulière au président Banal, qui venait d'EDF, comme Joseph Jacquet, – le père Joseph comme le nommait Pierre Guillot qui n'en manquait pas une –, lequel faisait le lien avec les universitaires et chercheurs des sciences physiques, et surtout au président du comité technique Cazenave, alors directeur à la compagnie du Rhône. Cazenave avait une façon inimitable de diriger les débats au sein du comité technique, pleine de gentillesse, d'humilité et d'efficacité.

Chapitre 12

Rebondissements dans l'affaire de la variabilité des totaux annuels des précipitations

En 1981, eut lieu une session du comité technique de la SHF sur les précipitations atmosphériques. Il y eut plusieurs présentations de grande qualité, mais c'est celle de Petit-Renaud qui m'a le plus marqué. Petit-Renaud montrait les moyennes glissantes sur 30 ans des stations des pays de la façade européenne atlantique au sens large, mer du Nord comprise. Toutes avaient la même allure, une très large amplitude avec un maximum et un minimum concomitants à une ou trois années près. C'était un fait à la limite incroyable mais bien réel. Pierre Guillot était intervenu pour souligner la ressemblance des courbes malgré les différences organisationnelles de gestion des réseaux pluviométriques d'un pays à l'autre. La réalité du phénomène l'emporte sur la façon de l'appréhender. Son amplitude dépasse largement celle du bruit provenant des diverses sources d'erreurs de mesurage. Cela signifiait qu'en plus de la variabilité aléatoire repérée en un point d'observation, doté d'un même coefficient de variation de 0,18 affectant tous les autres points d'une vaste zone non encore délimitée, se surajoutait une organisation des séquences de 30 totaux annuels sur une zone constituée par la façade Atlantique. Et peut-être sur une zone plus importante.

Plusieurs questions viennent alors à l'esprit. S'agit-il d'un tirage au sort unique pour une zone donnée ? Cette même évolution affecte-t-elle tous les points du continent euro asiatique, voire tous les points du globe ? Si c'est le cas, il se révèle un problème de taille qui est le suivant : d'un côté, on accepte l'existence d'une constante solaire qui entraînerait le pompage d'un volume équivalent d'eau chaque année et sa restitution intégrale au ras du globe, et d'un autre côté on noterait

des écarts considérables entre 2 périodes de trente ans. Une explication plausible – mais est-ce la bonne ? – est que l'allure générale des moyennes mobiles se modifie en allant vers l'est pour repartir de l'étude de Petit-Renaud. Comment se modifie-t-elle ? On ne peut le savoir qu'en réalisant un travail systématique sur tous les points de mesure du globe, en dépassant le stade de la seule publication des normales trentenaires. Y a-t-il une organisation des séquences à l'échelle hémisphérique ou à celle du globe, en fonction de la variation des stocks de chaleurs dans les masses océaniques comme pour El Niño ? Et une multitude d'autres choses. Voilà du grain à moudre pour les chercheurs. Sans même évoquer les séquences au sein de chaque année, comme l'avait suggéré Yevjevich sur la probabilité d'avoir 10 années consécutives d'étés pluvieux. ... Peut-être que les réponses existent déjà. Ceux qui se pencheront sur cette question, se contenteront-ils de réactiver l'emploi des séries de Fourier pour chercher la présence de cycle. Comme l'outil du chercheur devient souvent la finalité de sa recherche, à tout hasard en actionnant les séries de Fourier sur des données réparties sur un continent, une réponse même faible changerait le statut dudit chercheur en découvreur.

Le second rebondissement date de la conférence de Villach en 1986 : les climatologues d'obédience astrophysicienne déclarèrent une augmentation de l'effet de serre suite aux émissions anthropiques de dioxyde de carbone. Si on admet l'hypothèse du réchauffement climatique dû à l'effet de serre, il pourrait se produire une accélération des flux d'entrées et de sorties de l'eau de l'atmosphère. Donc une tendance à l'accroissement des totaux annuels de précipitations, ce qui rendrait caduque l'hypothèse de la stabilité du phénomène pluvieux que j'évoquais en conclusion du chapitre 4. C'est un scénario parmi de nombreux autres possibles. Or ce n'est pas encore inscrit dans les données pluviométriques utilisées précédemment. On me rétorquera que les faits que j'ai constatés concernent les observations antérieures à l'année 1965. Oui, mais les quelques indications que j'ai recueillies en France sur la période ultérieure confirment l'existence d'un coefficient de variation constant à 0,18. Il me paraît urgent de se pencher sur ce point : s'il y a effectivement changement ou non, il faudra bien en tirer des enseignements pour la suite.

Le fait d'étudier uniquement ce qui tombe au ras du globe entraîne d'autres questions sur la variation du stockage dans l'atmosphère. En

effet, c'est l'atmosphère qui fournit la totalité des précipitations et condensations. C'est aussi l'atmosphère qui recueille toute l'eau qui s'évapore du globe. L'atmosphère est le lieu de stockage et de restitution. Elle régule les échanges hydriques entrant et sortant au ras du globe et entretient la difficulté d'établir un bilan des sorties – les précipitations et condensations –, des entrées – l'évaporation –, et du stockage dans l'atmosphère. Avec son système en cellules, celle de Hadley, celles de Ferrel entre les latitudes 30° et 60° sur les deux hémisphères et les deux cellules polaires, la circulation atmosphérique présente une organisation zonale qui dirige la traversée de la pluie au dessus des continents et des océans.

Un autre élément très important du système global est l'immense volume des océans, siège du stockage et du déstockage de quantités phénoménales de chaleur. C'est un appoint fondamental de la machine thermodynamique de l'atmosphère, actionnée principalement par le rayonnement solaire et par les rotations de la terre. La connaissance des variations de température de ces énormes masses semble encore difficile à obtenir. Pourtant, ce sont elles qui conditionnent vraisemblablement une part importante de la variabilité des masses évaporées, et par conséquence des précipitations. Les deux tiers de la surface du globe sont occupés par les océans. Se peut-il que la traversée de la pluie y soit tout aussi importante et variable que sur les terres émergées ? Autrement dit, se peut-il que la répartition des pluies au ras du globe se produise de façon aléatoire, par exemple jusqu'aux trois quarts de son volume total annuel sur les océans et différemment les autres années ? Voilà une question qu'elle est belle, aurait dit Coluche !

Si l'on suit les astrophysiciens d'avant 1986, il ressort une certaine constante solaire qui entraîne de facto des entrées stables en moyenne⁵¹ de l'eau dans l'atmosphère d'une année à l'autre ; donc des sorties sous des formes diverses de précipitation et de condensation, ce qui a amené des chercheurs comme Wust à établir un bilan des flux d'eau au niveau de notre planète. Avec ceux d'après 1986, il y aurait une augmentation de l'énergie développée au ras du globe, donc une possible augmentation des flux d'entrée et de sortie de l'eau dans l'atmosphère. Sans parler d'un éventuel accroissement du volume de stockage : l'air devenant

51. En ayant conscience des perturbations entraînées par les stockages et déstockages de chaleur dans les océans.

globalement plus chaud, la vapeur d'eau peut y être plus abondante et, au final, entraîner une rétroaction positive sur l'effet de serre ! De quels éléments dispose-t-on ?

- Les sorties sont mesurées sur les terres émergées depuis des dizaines, voire quelques centaines d'années. Rien sur les océans.
- Les entrées sont évaluées à l'aide de calculs, à partir de tout un arsenal de formules existantes où le chercheur peut faire son marché, sans risquer la confrontation à une réalité difficilement mesurable.
- Les différences de stockage peuvent être évaluées à l'aide des mesures d'humidité de l'air en différents points du globe – radio sondages et mesures au sol – et de protocoles de calculs.

A partir de là, 3 attitudes sont possibles. Le naturaliste ancré dans sa surface d'étude au ras du globe ne peut dresser de bilan hydrique global : ledit naturaliste se limite l'un, agronome, à son exploitation agricole, le second, hydrologue, à la surface de son bassin versant, le dernier, géographe, à un pays au mieux à un continent. Tous observent la traversée de la pluie au-dessus de leurs têtes et ne peuvent faire autrement que de négliger ce qu'il se passe au-delà de la surface qu'ils étudient. La plupart du temps, aucun de ces corps de métier ne pratique le mesurage des précipitations. Tous utilisent les données fabriquées par les services météorologiques, lesquels n'en ont pas beaucoup besoin pour accomplir leur métier de prévision du temps. Le météorologue qui ne s'occupe que des états et des mouvements de l'atmosphère, ne peut dresser un bilan hydrique global parce que ce n'est pas ce qu'il lui est demandé. Seul l'astrophysicien peut se lancer dans cette aventure à partir du bilan radiatif global, sans doute au prix de compromis avec la réalité de terrain.

D'un corps de métier de recherche à l'autre, les unités de mesures diffèrent notoirement. L'astrophysicien transforme les bilans radiatifs – je ne sais comment –, et évalue des flux hydriques moyens annuels en kilomètres cubes, comme Wust l'ancêtre cité dans le *Handbook of Meteorology* de 1945. Voir plus loin le chapitre 22 consacré au bilan global. Le naturaliste agissant au ras du globe, qu'il soit agronome, hydrologue ou géographe, emploie volontiers le millimètre sur son pas de temps favori. En fonction de la surface étudiée, il est capable de passer facilement au volume ou au débit ou de revenir au millimètre

pour exprimer un débit ou un module spécifique : par exemple 1 litre/seconde par kilomètre carré et par an équivaut à 31,5 millimètres par an. Et maintenant le météorologiste professionnel qui officie dans les médias nous sert au quotidien des litres d'eau par mètre carré, au lieu de s'exprimer tout bêtement en millimètres comme il le faisait auparavant. C'est le côté cocasse de la barbarie du spécialisme qu'évoquait dès 1930 le philosophe espagnol José Ortega y Gasset. *« Autrefois les hommes pouvaient se partager, simplement en savants et en ignorants, en plus ou moins savants en plus ou moins ignorants. Mais le spécialiste ne peut entrer en aucune de ces deux catégories. Ce n'est pas un savant, car il ignore tout ce qui n'entre pas dans sa spécialité ; mais il n'est pas non plus un ignorant, car c'est un « homme de science » qui connaît très bien sa petite portion d'univers. Nous dirons donc que c'est un savant – ignorant, chose extrêmement grave, puisque cela signifie que c'est un monsieur qui se comportera dans toutes les questions qu'il ignore, non comme un ignorant, mais avec toute la pédanterie de quelqu'un qui dans son domaine spécial est un savant. »* Citer un auteur, c'est réduire sa pensée : aussi je vous invite à la lecture de ce chapitre de son livre *« La révolte des masses »*. On peut ne pas adhérer à ce qu'il écrit, mais au moins on y trouve d'abondantes graines de réflexion. Bref, on sort du brouet quotidien.

Existe-t-il un caractère stable du phénomène pluvieux au sens large de tout ce qui tombe à la surface du globe sous forme liquide, solide (neige, grêle, grésil) ou gazeuse (condensation de la vapeur d'eau) ? Cette question reste entièrement ouverte. Le terme de « caractère stable » me permet d'éviter soigneusement celui de stationnarité que les statisticiens emploient de surcroît avec des nuances entre la stationnarité faible et la stationnarité forte.

Un dernier mot sur les différences de culture et de méthode de 3 corps de métiers. Les astrophysiciens disposent d'un terrain de recherche incomparable : la mécanique céleste qui leur permet de faire avec succès des prévisions minutieuses à très longue échéance. Citons l'exemple des éclipses dans le monde sidéral et celui des marées dans notre monde à nous : sur un point donné de la côte bretonne on sait exactement pour une date donnée, quel vont être le coefficient de marée et la hauteur de la mer à la minute près. Il peut y avoir des variations liées aux circonstances atmosphériques du moment qui tendent à atténuer ou à amplifier la hauteur prévue, comme ce fut le cas dans

la catastrophe du 28 février 2010 sur le littoral vendéen, où la tempête Xynthia s'est produite en concomitance avec la grande marée. Mais la prévision reste exacte en ce qui concerne la partie relevant de la mécanique céleste, tout comme celle du météorologue deux jours avant le passage de la tempête. On peut dire que le déterminisme fonctionne ici à plein. Descendons d'un cran de l'espace sidéral au niveau de l'atmosphère : le météorologue dispose de la connaissance de la mécanique céleste et doit faire appel aux lois de la thermodynamique pour effectuer sa prévision du temps. Cette prévision est bonne à brève échéance comme dans l'exemple de Xynthia, mais se détériore complètement au bout de quelques jours : il faut la réactualiser sans cesse. Nous sommes dans le domaine des sciences de l'imprécis, chères à Albert Moles qui a écrit un livre sur ce thème à la fin du 20^{ème} siècle. A long terme, on peut à coup sûr prédire qu'il ne gèlera pas à Paris le 1^{er} août, ni que la canicule y surviendra le 1^{er} janvier, sous réserve d'une certaine stabilité du climat. Dans la position du météorologue, on s'appuie pour partie sur un déterminisme à toute épreuve, celui de la mécanique céleste et pour une autre sur un déterminisme beaucoup moins sûr, celui de la thermodynamique. Pour pimenter le débat, on pourrait y ajouter un zeste de calcul de probabilité comme le faisaient les québécois pour la prévision de la pluie, mais de mon temps, ce n'était guère à la mode chez les météorologues français. Quand on arrive au ras des terres émergées, l'hydrologue doit composer avec le rayonnement solaire, avec une partie de la mécanique céleste – les cycles diurne et saisonnier –, avec de la thermodynamique, avec le relief et les complexes formés du sol et de la végétation auxquels il lui faut ajouter toute la dynamique des fluides en zone saturée et non saturée, les situations d'accumulation neigeuse et de gel, et enfin l'écoulement en rivière : la prévision déterministe n'est possible que dans peu de cas, par exemple en cours de crue pour annoncer les cotes du fleuve Seine à Paris ou pour indiquer le premier mars un débit minimal attendu le 1^{er} juillet au cas où il ne pleuvrait pas d'ici là. En dehors de ces cas précis, les hydrologues se trouvent alors contraints de travailler avec les outils à leur disposition, en particulier ceux mis au point par les mathématiciens probabilistes. Mais pas pour faire de la prévision, seulement de la prédétermination. La seule condition commune aux trois métiers précédents est de travailler à partir d'observations effectuées en grand nombre et sur de longues périodes, mais pas forcément les mêmes observations. Chacun de ces trois corps possède en son sein des équipes de recherche en climatologie, avec des

thèmes, des objectifs, des méthodes, des sources d'information et des comportements différents parce que liés à leur corps d'origine. Gageons que la définition même du terme « climatologie » comporte des flexions telles qu'il soit difficile d'identifier un domaine commun à ces trois corps. Très récemment je viens de parcourir les livres du CNED pour la préparation au concours de recrutement des professeurs des écoles et, au tome 2 consacré aux sciences expérimentales et technologie, je lis page 39 la phrase suivante : « *les climatologues prévoient une augmentation de la température du globe entre 1,5°C et 6°C à l'horizon 2100* ». Je ne sais pas si les bambins qui recevront cet enseignement, vivront assez longtemps pour vérifier cette assertion. Quel type de climatologue a pu écrire cette phrase totalement déterministe, mais aussi peu assurée sur les termes mêmes de la prévision ? Ce ne peut être un météorologue prévisionniste confronté quotidiennement aux écarts entre sa prévision et la réalité constatée, encore moins un climatologue du ras du globe, qu'il soit agronome, hydrologue, géographe ou autre. Vous l'avez compris, ce ne peut être que quelqu'un qui vit imprégné de la culture astrophysicienne.

Deuxième partie

**LES PRÉCIPITATIONS
ATMOSPHÉRIQUES
ET L'HYDROLOGIE DE SURFACE**

Chapitre 13

Regarder la pluie tomber

« Quelle est belle ma Bretagne quand elle pleut » (Jean Michel Caradec)

Les précipitations sont en théorie des flux verticaux descendants, composés de gouttes, de gouttelettes, de flocons, de grêle, de grésil, de brume et de vapeur d'eau se condensant sur le ras du globe. De ma véranda bretonne, je vois la pluie poussée par le vent d'ouest presque à l'horizontalité. Ce sont de très fines gouttelettes qui vont se coller contre la haie de pins leyland haute de 5 mètres. Et pourtant la pelouse qu'elle a survolée est trempée elle aussi. Sans toutefois recevoir la même quantité que le côté de la haie situé au vent. Quel serait le résultat fourni par un pluviomètre muni d'une bague circulaire de réception de 400 centimètres carrés⁵² placé entre quelques décimètres et 1,5 m du sol⁵³ et soumis en permanence aux effets du vent ou de la turbulence de l'air. Il est systématiquement sous-estimé du fait que dans le meilleur des cas, sans vent, la surface de réception est bien égale à celle de son cercle (soit 400 cm²). Dès qu'il y a un souffle d'air, le flux devient oblique et le cercle de réception se transforme en une ellipse dont le grand axe est égal au diamètre d du cercle et dont l'axe perpendiculaire varie de 0 à d ⁵⁴. Tout cela dépend de la force du vent agissant sur le flux aqueux vertical descendant et de son caractère ascendant ou

52. C'est la surface choisie déjà par Belgrand en 1853 et qui fut adoptée par la suite.

53. On voit pourquoi Belgrand avait choisi une hauteur à 0,8 m du sol, afin de minimiser les effets du vent, alors que l'OMM préconise 1,5 m. Il existe aussi des essais avec des pluviomètres dont la bague de réception est calée au ras du sol, comme à la station royale belge d'Uccle. C'est difficile à mettre en œuvre chez des bénévoles.

54. Je n'ai jamais vu cela écrit quelque part. Mais j'assume !

descendant. Je ne parle pas de tous les cas comiques de vents tournants, tourbillonnants et autres facétieux qui pourraient être modélisés à l'aide d'ordinateurs contemporains et surtout grâce à des chercheurs insolites. Dans mes recherches bibliographiques de l'époque de mes travaux sur la pluie en Seine-Normandie, je me suis trouvé face à un véritable Concours Lépine du pluviomètre qui ne subirait aucune sous-estimation due au vent. C'est ainsi que je découvris le pluviomètre girouette orientable face au vent grâce à des ailerons semblables à ceux des fusées. Et aussi le pluviomètre tambour enregistrant les bruits des gouttes d'eau dans différentes fréquences. J'en avais dénombré plusieurs dizaines du même tonneau. Il faut ajouter que les cas de surestimation de la lame d'eau précipitée sont quasi nuls. Cependant il me revient en mémoire une page de souvenirs d'enfance de Pierre Gaxotte où quelques garnements, dont le susnommé, s'ingéniaient à vider leurs vessies dans le pluviomètre de la paroisse.

Une autre fois, c'était en juillet 1972 à Paris, lors d'un de ces orages qui avait causé la submersion temporaire du périphérique Sud près de la Porte de Saint Cloud. J'étais monté à une terrasse de l'immeuble où j'habitais, rue de Lourmel dans le 15^{ème}. Là, bien à l'abri de la terrasse du dessus, j'avais assisté à la disparition complète de la rambarde de protection derrière un mur d'eau. Cette rambarde était distante de 2 m et comme j'étais bien abrité, le mur d'eau ne pouvait pas avoir plus d'un mètre de large. Cette disparition de ma vue a duré plusieurs secondes. Une, deux minutes ? Difficile à dire tant le spectacle était prenant. A quelle intensité maximale pouvais-je estimer ce phénomène ?

A Nouméa, j'ai vécu le cyclone Erica en mars 2003 dans notre maison située sur un versant abrité, orienté au Sud. Le monstre se dirigeait vers le Sud. Avant de nous trouver dans l'œil, il y eut d'énormes rafales de pluie et de vent, mais sans trop de conséquences pour notre habitation⁵⁵. Nous restâmes dans l'œil une trentaine de minutes, dans une atmosphère très calme sans une goutte de pluie. Et en une seconde la maison se trouva dans un mélange d'air et d'eau circulant à 220 km/h⁵⁶. Pendant les 20 minutes qui suivirent, j'ai épongé l'eau

55. Pourtant, le toit du bâtiment de la météo, situé au dessus sur le sommet de la colline, s'était envolé pour atterrir quelques dizaines de mètres plus loin, sans causer de victimes.

56. L'anémomètre de la station météo située juste au dessus de notre maison s'est brisé juste après avoir enregistré cette vitesse. En hémisphère Sud le cyclone tourne dans le sens des aiguilles d'une montre.

qui pénétrait sous la porte d'entrée pourtant protégée par les persiennes closes. Une bonne trentaine de litres passés sous une porte de 1 m de large. Je me suis tenu à ma décision, prise deux ans plus tôt, de ne plus m'occuper du mesurage des précipitations, pas même celles de type cyclonique en zone intertropicale, avec des abats pouvant atteindre et dépasser 3 mètres en moins de 24 heures⁵⁷. Je ne me suis pas informé de ce qu'il avait pu être mesuré pendant Erica.

Plus récemment, il y a 4 ou 5 ans, sur la 4 voies qui borde la baie du Mont-Saint-Michel, vers Dol de Bretagne, je vis arriver dans le ciel encore lumineux une masse d'eau de la forme d'une poutre tordue, étirée sur quelques mètres qui s'est abattue sur la chaussée. Aussitôt après, tout devint sombre, sans phénomènes électriques dans l'atmosphère. La circulation s'arrêta en quelques secondes ; mon véhicule reçut au total 3 paquets d'eau. La chaussée était recouverte d'environ une dizaine de centimètres. Puis progressivement tout rentra dans l'ordre et la circulation reprit. A l'époque je ne voulais toujours pas replonger dans mes très anciennes activités intellectuelles et je ne pris même pas la peine de noter quoi que ce soit, pas même la date, ni de me renseigner. Mais là encore comment appréhender l'intensité du phénomène, sans parler de sa genèse. Sur ce dernier point, je ne me suis jamais préoccupé des problèmes de la formation des précipitations avec des processus très différents. Quelle est la probabilité qu'un appareil capte un paquet d'eau équivalent à l'un de ceux-là ? Combien ce paquet représente-t-il ? 10 à 20 cm en moins d'une seconde ? Quelle est la surface affectée par un tel phénomène ? Avec quelle quantité totale d'eau pour une surface d'un hectare ou plus ? Ne pas oublier qu'il ne s'agit que de paquets forcément très discontinus dans l'espace et limités en nombre.

Ces quelques exemples montrent la difficulté du mesurage des précipitations, en évitant celui de la neige auquel j'ai été peu confronté. Mais pour mes collègues de la DTG d'EDF, c'était une question primordiale, car elle conditionnait la prévision des apports printaniers et estivaux dans les lacs de barrages hydroélectriques.

Et que dire d'un phénomène qu'on ne peut pas voir ? Avant mon départ pour la Tunisie début 1963, mon professeur, Gabriel Rougerie, m'avait concocté un stage d'initiation à la stabilité structurale des sols

57. Communication orale de Trendel qui avait été en poste à la Réunion et qui fut le premier chef du « bureau de l'eau » à la division « climatologie » de la Météo Nationale.

auprès de Combeau, l'inventeur de l'indice éponyme, dans les bâtiments de l'ORSTOM à Bondy. Il faisait froid, environ moins 10°C à moins 5°C, avec un brouillard persistant et pas de température positive. Durant la dizaine de jours de mon stage, Combeau fit des prélèvements d'échantillons de sol dans les parcelles expérimentales et constata que leur teneur en eau croissait chaque jour. Je ne sais pas ce qu'il fit de ces résultats, mais j'avais perçu une variante du phénomène des précipitations dites occultes. Quelques années plus tard après l'installation du RPC, je me rendis compte que les pluviomètres translucides avec l'éprouvette incorporée captaient la rosée. Des observateurs notaient des quantités de rosée, jusqu'à 8 ou 9 dixièmes de millimètres. C'est considérable. La rosée est un sujet intéressant pour un climatologue orienté vers la plante. L'hydro-climatologue a tendance à ne pas s'en préoccuper. C'est une erreur, car pendant tout le temps où le phénomène de rosée se produit, il n'y a pas d'évaporation.

Chapitre 14

L'excès d'écoulement, résultat inattendu de la barbarie du spécialisme

Peu avant ma retraite, Jacques Sircoulon, qui assurait le secrétariat du CNFSH me fit un énorme cadeau : l'atlas de Polynésie française pour mon départ dans le Pacifique sud. Ce fut un grand plaisir parce que la réalisation de cet atlas avait été dirigée par mon camarade de 3^{ème} cycle à Besançon, Jacques Bonvallot de l'IRD. Très vite je n'ai pu résister à une de mes manies, le bilan hydrologique, et je me suis aperçu que les lames d'eau écoulées étaient systématiquement supérieures à la pluviométrie. A la vérité, je m'y attendais parce que la section « hydrologie » avait disparu après la transformation de l'ORSTOM en IRD et la retraite de Marcel Roche. Et la pratique de la critique hydrologique s'était étiolée faute de participants. J'avais simplement procédé à la conversion des modules, c'est à dire des débits moyens observés à l'exutoire des bassins versants, en modules spécifiques exprimés d'abord en litres par seconde et par kilomètre carré, puis en millimètres par an pour les rendre directement comparables aux précipitations moyennes annuelles, comme nous l'avons déjà vu précédemment. Même si les périodes d'observations peuvent être différentes, le résultat est là, incontestable. Jacques Bonvallot ne pouvait pas se douter qu'il était victime de deux spécialités qui s'ignorent parce qu'elles appartiennent à deux institutions différentes, l'une rattachée au ministère des Transports, l'autre au ministère de la Coopération⁵⁸ : d'un côté les météorologues et de l'autre les hydrauliciens de l'ORSTOM (hydrologues ?) chargés du mesurage des débits des cours d'eau. Ce n'est pas de la détestation entre eux, c'est

58. Depuis ces rattachements aux ministères de tutelle ont beaucoup évolué : cette instabilité récurrente éloigne davantage qu'elle ne rapproche ces deux spécialités.

ainsi : à chacun son travail, sans connaître ce qu'il se passe ailleurs, au-delà de ses propres préoccupations. Joseph Jacquet me rappelait souvent qu'Auguste Comte nous avait piégés avec sa classification des sciences et qu'on arrivait à la stupidité de morceler l'eau sous tous ses états et dans les différentes phases de ses mouvements à travers des spécialités qui s'ignorent, sans vraiment être en situation de recoller les morceaux. En Polynésie il s'écoule plus qu'il ne pleut ! Ce qui entraîne qu'il n'y a pas d'évaporation sous ces tropiques-là ! En outre, d'où provient l'eau qui ne précipite pas ?

Cette affaire me rappelle ce que m'avait raconté un collègue d'une autre agence de bassin alors que, dans sa vie antérieure, il avait été responsable d'un service de police des eaux. Un industriel avait été pris sur le fait de polluer un canal de la navigation. Il avait été fait appel à deux bureaux d'études pour constater la nature et l'ampleur de la pollution. Leurs résultats se trouvaient diverger notablement sur les concentrations des matières polluantes et en réunion, chacun défendait son travail et ne voulait pas en démordre. Il était dix heures du matin ; mon collègue leur demanda de se mettre d'accord, en les enfermant dans la salle. « Je n'ouvrirai la porte que lorsque vous vous serez mis d'accord, peu m'importe les concentrations que vous choisirez ». A midi trente ils étaient d'accord et ils allèrent déjeuner.

Mon collègue avait les éléments nécessaires et indiscutables pour la transmission de son rapport au préfet, lequel déciderait du montant de l'amende ou de transmettre au procureur au titre d'une pollution aggravée nécessitant une action judiciaire.

La conclusion est qu'au sein d'une même spécialité il peut y avoir grave controverse. Que dire avec deux spécialités différentes ? Placé devant la responsabilité de diriger cet atlas, comment aurais-je réagi à la découverte de cette ineptie ? J'aurais eu le choix entre trois comportements : soit je laissais les choses suivre leur cours sans rien dire de ma découverte, soit j'admettais la réalité du problème en le soulignant à l'attention des lecteurs pour qu'ils comprennent bien la difficulté dans toute son étendue, soit je constituais une commission pour harmoniser les cartes et passer la difficulté sous silence. C'est bien entendu la seconde solution que j'aurais choisie parce que j'imagine mal la conduite de la commission du compromis : qui aurait lâché prise et pour quel résultat final ?

En l'absence d'une comparaison critique, le problème n'existe pas : il n'y a pas d'excès d'écoulement. C'est d'autant plus amusant qu'en Métropole beaucoup d'ingénieurs ou de chercheurs se sont penchés sur la façon d'évaluer le déficit d'écoulement et d'en obtenir un ordre de grandeur convenable pour la conduite de leurs travaux. Il suffit de citer la formule d'Aimé Coutagne et celle de Turc, élaborées à partir de données ponctuelles de précipitation et de température de l'air, parmi de nombreuses autres tentatives. C'était avant et juste après la Seconde Guerre mondiale. A l'époque, la notion de déficit d'écoulement allait tout à fait de soi et son calcul s'effectuait sur des durées annuelles : sur la France septentrionale son résultat le plus courant se situait entre 350 et 550 millimètres.

Chapitre 15

La densité des pluviomètres à l'épreuve d'un orage

Plusieurs orages exceptionnels eurent lieu en juillet 1972 sur l'Île-de-France. L'un d'entre eux provoqua 2 morts dans le secteur du Val d'Oise et de Seine Saint Denis. Cet événement fit l'objet d'une enquête administrative et Yann L'Hôte, alors stagiaire à l'ORSTOM, fut chargé du volet pluviométrique. Je fus destinataire de son rapport accompagné d'une carte d'isohyètes. C'est cette dernière qui retint toute mon attention. L'épisode pluvieux, d'une durée inférieure à 2 heures, présentait une forme allongée avec des hauteurs supérieures à 150 mm au cœur. Le poste du réseau complémentaire (RPC) un peu éloigné de l'épicentre affichait une trentaine de mm. Celui de la Météorologie nationale situé légèrement en marge, indiquait 70 mm. Les valeurs supérieures résultaient d'une enquête minutieuse sur le terrain auprès de la population rurale, principalement sur les exploitations agricoles toujours à l'affût de renseignements utiles pour leurs travaux des champs. Les valeurs maximales se situaient à un peu plus de 150 mm (165 mm ?). En région parisienne, c'était tellement considérable qu'aucune pluie de cette importance n'avait jamais été mesurée en réseau officiel. Une dizaine d'années plus tard je rencontrai Yann L'Hôte à la réunion annuelle du CNFSH dont il était devenu membre. J'évoquai avec lui son remarquable travail d'enquête sur le terrain. Il me confia alors que plusieurs personnes, surtout situées dans les exploitations agricoles, avaient mentionné avoir mesuré 180 mm et même davantage. De peur de ne pas être pris au sérieux, Yann s'était autocensuré et avait retiré ces valeurs. Je n'ai pas eu le réflexe de lui demander comment tous ces observateurs avaient procédé et avec quel matériel : j'ai en tête que le pluviomètre de faible capacité utilisé sur notre territoire hexagonal peut déborder

à environ 100 mm. Aujourd'hui je me demande encore comment ils se sont débrouillés. Je sais que la passion de l'observation peut les conduire à se faire tremper pour faire le nécessaire et obtenir la valeur la plus précise.

J'ai eu ce rapport entre les mains quelques semaines plus tard, après tous ces événements de juillet 1972, sur l'Île-de-France mais aussi ailleurs, par exemple sur le département de la Marne où le réseau complémentaire enregistra 120 mm à Sogny-en-l'Angle⁵⁹ au tout début juillet : c'était la première fois que je rencontrais une valeur observée supérieure à 100 mm sur le bassin Seine-Normandie⁶⁰, tous réseaux confondus. Cela me confirma que j'avais poursuivi des chimères avec les relations pluies débits tant vantées au milieu des années soixante et qui devaient nous aider à bien connaître la ressource en eau, tant superficielle que souterraine. En effet, pour reprendre le cas du secteur du Val d'Oise et de Seine-Saint-Denis, comment déterminer la lame d'eau précipitée et en déduire le volume écoulé lorsque nous ne possédons que les renseignements des réseaux officiels, sans risquer de faire une énorme sous estimation ? D'une manière générale, pour des relevés quotidiens de pluies exceptionnelles ou à pas de temps plus courts, la densité du réseau est toujours très insuffisante : d'où l'idée de chercher à déterminer un coefficient d'épicentrage, par analogie à l'épicentre d'un tremblement de terre, une idée développée par Thierry Leviandier du CEMAGREF, par un raisonnement mathématique. Il a très vite fallu se rendre à l'évidence que nous manquions de données expérimentales suffisantes, malgré l'existence de bassins expérimentaux comme ceux de l'Alrance ou de l'Orgeval. Et les aurions-nous eues, comment se débrouiller ensuite ? On le voit : l'estimation de la lame d'eau précipitée se heurte à deux sources importantes de sous estimation, l'une liée au capteur lui-même placé à 1,5 m au dessus du sol et l'autre à la densité desdits capteurs sur l'aire géographique considérée. Le défi est gigantesque pour modéliser et parvenir à l'estimation de la lame d'eau écoulée.

Bien plus tard en 1984 lors de la dernière séance de la section « pluviométrie » de la SHF, Pierre Guillot nous a fait connaître les travaux

59. Cette commune se trouve sur le bassin de la Vière, qui devait constituer la cuvette du projet de barrage réservoir de Villers-le-Sec, conçu en dérivation de la Saulx de la Chée et de l'Ornain sur le même mode que le lac du Der en dérivation de la Marne ou que le lac de la forêt d'Orient en dérivation de la Seine.

60. En prenant en compte les 20 000 stations années que nous avons informatisées.

de Herschfield, lesquels remontaient aux années 1950-60. Durant toute sa vie, Herschfield, du laboratoire d'hydrologie du ministère de l'agriculture du Maryland, mena des recherches motivées par les dizaines, voire bien au-delà de la centaine de ruptures de barrages qui s'étaient produites et se produisaient encore durant les dernières décennies aux Etats-Unis. Plus des deux tiers de ces catastrophes étaient dues à des crues exceptionnelles que les ouvrages mal dimensionnés, notamment les évacuateurs de crues, ne pouvaient encaisser ou amortir. Ce n'étaient pas tous des ouvrages de très grandes dimensions, mais il y en avait. L'objectif était de comprendre l'ampleur de ces crues et leur probabilité d'occurrence afin d'établir des règles de dimensionnement pour faire face. Très vite, Herschfield a compris que la manière la plus judicieuse d'aborder l'étude était de passer par les données pluviométriques. Or les Etats-Unis possèdent de vastes étendues peu peuplées et les réseaux officiels étaient insuffisants. D'où la recherche de données non officielles, lesquelles montraient déjà que les précipitations étaient en réalité plus importantes que si on ne les regardait qu'à travers le réseau officiel. Aussi, après chaque événement pluviométrique important, notamment ceux ayant entraîné une catastrophe comme la rupture d'un barrage, Herschfield faisait procéder systématiquement à une étude de terrain appelée « bucket survey » et destinée à recueillir toutes les informations sur le remplissage de récipients, pluviomètres ou autres, de manière à mieux cerner l'événement. Les résultats qu'il en tirait allaient toujours dans le sens d'un accroissement important des valeurs obtenues par rapport à celles des réseaux officiels.

Paradoxalement, Herschfield a semblé toujours préoccupé de trouver le pluviomètre représentatif du bassin versant étudié, sorte d'indicateur à relier aux débits observés à l'exutoire. Il faut dire que c'était dans l'air du temps, en grande partie parce que l'informatique était débutante et qu'on croulait vite sous une masse d'information difficilement manipulable. Ainsi Herschfield procéda à des corrélations entre les données journalières pluviométriques de plusieurs orages sur un bassin pour déterminer le « key raingage⁶¹ » ou le pluviomètre de référence. Il répéta l'opération sur une quinzaine de bassins versants répartis sur la moitié Est des Etats-Unis. Je pense qu'il faisait l'impasse sur la connaissance la plus précise de la lame d'eau précipitée pour ne se consacrer qu'à l'utilisation de ce pluviomètre de référence dans la modélisation.

61. « Raingage » est un américanisme de l'anglais « raingauge » signifiant pluviomètre.

En France, depuis longtemps déjà on utilisait un pluviomètre sans se préoccuper de sa représentativité pour faire des calculs, par exemple celui du déficit d'écoulement. Le fait de rechercher ce pluviomètre représentatif semblait déjà un progrès ; en revanche, on continuait à évacuer la connaissance détaillée de la lame d'eau précipitée, comme dans ma première étude en Tunisie que je cite au premier chapitre et où le pluviomètre représentatif s'imposait puisqu'il était seul ! En 1969, l'agence Seine-Normandie possédait déjà un gros stock de cartes perforées des données pluviométriques du sud-est du bassin sur les bassins amont de l'Yonne, de la Seine, de l'Aube et de la Marne. Je voulais les utiliser pour faire des corrélations entre postes. A l'époque j'ignorais les travaux de Hershfield et l'agence n'était pas sortie de la mécanographie. Je contactai les ingénieurs d'électronique Marcel Dassaut, que cela amusait beaucoup : ils conçurent une machine avec une mémoire centrale de 48 octets qui était suffisante pour contenir un programme de corrélation linéaire, avec à l'entrée deux mécanismes de lecture des cartes perforées des 2 stations à corrélérer et une imprimante pour éditer les résultats. L'agence manquait déjà de place et cette machine baroque fut installée à l'accueil à côté de la standardiste, ce qui ne manquait pas d'intriguer les visiteurs. Les premiers résultats imprimés avec des coefficients de corrélation aux environs de 0,7 et 0,8 étaient encourageants. Mais à quoi allaient-ils servir, sinon à réduire la voilure du RPC ? Très vite je compris que j'avais passé les bornes de la mission de l'agence. Le service redevance était intéressé par l'idée, mais ne trouva pas un réemploi adapté, d'autant que les techniques informatiques de calcul progressaient vite et que la mécanographie vivait ses derniers instants.

Sur internet j'ai retrouvé la communication d'Hershfield à ce colloque de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, où il évoque ces questions d'espacement⁶² des postes pluviométriques avec des exemples à l'appui. C'était en 1965. Dans la discussion qui a suivi, Jean Rodier de l'ORSTOM apporta les informations suivantes que je crois utiles pour la compréhension. « *Au cours des études effectuées sur plusieurs dizaines de bassins représentatifs installés surtout en Afrique Occidentale et en Afrique centrale, les hydrologues français sont arrivés aux conclusions suivantes : pour des orages tropicaux convectifs, il est*

62. Hershfield emploie le terme « spacing », c'est-à-dire espacement que nous français, infléchissons et traduisons par densité

possible d'arriver à une bonne situation de la hauteur moyenne de précipitations pour chaque averse avec les densités suivantes :

- 6 pluviomètres pour un bassin de 5 km²*
- 12 pluviomètres pour un bassin de 15 km²*
- 18 pluviomètres pour un bassin de 50 km²*
- 22 pluviomètres pour un bassin de 100 km²*

Ces chiffres sont trop faibles pour des régions à reliefs très accentués. On arrive aussi à des conclusions très voisines de celles de M. Hershfield sauf pour le bassin de Walnut Gulch⁶³, que nous avons visité et où effectivement la très grande variabilité spatiale des précipitations exige une plus grande densité. » Cette intervention m'inspire le commentaire suivant : avec la transformation en 1982 de l'ORSTOM en IRD et la suppression de sa division hydrologie, les sciences hydrologiques françaises et francophones ont perdu de leur consistance et de leur influence dans le monde. Cet affaiblissement a été accru par l'incitation des chercheurs à publier en sabir anglais, alors qu'il existe déjà une réelle difficulté à s'exprimer correctement dans sa langue natale.

63. Bassin situé dans l'Arizona, en zone aride.

Chapitre 16

La fréquence des précipitations quotidiennes extrêmes

A l'automne 1959, Fréjus fut ravagée par les eaux du Reyran, petit fleuve côtier de la Méditerranée, suite à la rupture du barrage de Malpasset. J'avais 20 ans et quelques mois et comme toute la France, alors en pleine guerre en Algérie, je fus secoué et attristé par le millier de victimes. Etudiant en géographie, je ne comprenais pas qu'un barrage fût emporté lors de sa première mise en eau, suite à une crue même exceptionnelle du Reyran. Nous avions les exemples de réalisations audacieuses par EDF, pour lesquelles il n'y eût pas de problèmes de ce genre, hormis les expulsions des habitants des zones qui allaient être submergées. J'appris par la presse que ce n'était pas EDF qui avait réalisé Malpasset, mais l'Etat par l'intermédiaire de la direction de l'agriculture du Var, cette dernière assurant à la fois la maîtrise d'ouvrage par délégation de l'Etat et la maîtrise d'œuvre. La finalité de l'ouvrage était d'assurer à la fois l'alimentation en eau de la population et l'irrigation des cultures de la plaine aval. Je fus très étonné qu'un barrage voûte de cette dimension ne soit pas réalisé par un service ayant acquis une grande compétence dans le domaine. Le barrage avait cédé par défaut d'ancrage sur une des rives du Reyran. Ce qui signifiait que l'ampleur de la crue n'était pas le facteur primordial. Au cours du procès qui suivit, deux questions entre autres furent débattues. La première concernait l'évacuateur de crue qui n'avait pas correctement fonctionné, soit par erreur humaine, soit par défaut technique. La seconde concernait directement la cause de la rupture : un des experts désignés par le pouvoir judiciaire, célèbre professeur de géologie de Nancy, indiqua qu'il avait découvert un phénomène jusque-là ignoré : celui des pressions intersticielles que la roche d'ancrage avait subies et qui avaient

produit la déstabilisation de l'ouvrage à cet endroit précis. Il courait une rumeur selon laquelle le site choisi pour l'emplacement du barrage était truffé de failles et qu'un minimum d'études complémentaires aurait dû conduire le maître d'œuvre à choisir un endroit plus sûr en le déplaçant de quelques centaines de mètres. Comme la responsabilité de l'Etat était fortement engagée, le procès se termina sans investigations très poussées sur celle de ses services. Toujours est-il que le Comité français des grands barrages réexamina les règles de construction et de gestion dans le sens d'une plus grande sécurité. Parmi les mesures importantes prises au cours des années suivant la catastrophe, je n'en ai retenu que trois. La première visait les ouvrages existants : tous les ouvrages devaient faire l'objet d'une visite décennale avec vidange totale du réservoir, ce qui posait bien des problèmes pour les ouvrages anciens⁶⁴. La deuxième concernait la première mise en eau d'un barrage en construction, qui devait se faire à mi-capacité du réservoir pour bien contrôler le comportement des ouvrages. La troisième préconisait l'évaluation de la crue de projet, de période de retour de 10 000 ans ou « décamillénaire », et de dimensionner les ouvrages en fonction des résultats obtenus. Il se trouve qu'en 1967 Pierre Guillot et Daniel Duband de la division technique générale (DTG) d'EDF publièrent un article sur la méthode dite du « gradex » qu'ils proposaient pour estimer les crues extrêmes et qui répondait en quelque sorte au vœu du comité français des grands barrages, ou qui l'inspirait : je ne me souviens plus de la chronologie exacte. Bien que n'ayant jamais eu à travailler sur les crues de projet⁶⁵ et n'étant pas du tout statisticien, je m'arrêterai sur cet événement que je juge très important dans l'histoire de l'hydrologie de surface.

Auparavant j'évoquerai la position de Hershfield. Dès les années 1960, Hershfield et d'autres chercheurs ont montré expérimentalement la pertinence de la loi de Gumbel pour fournir une estimation de la fréquence des pluies extrêmes, journalières voire horaires. Ce n'est pas pour autant que leurs travaux furent reconnus par les hydrologues

64. Je me souviens du barrage poids de Coindre sur la Rhue, dans le Massif central, appartenant à la SNCF, où la vanne de fond était bloquée par un amas de branches et de sédiments : les premières tentatives se soldèrent par la mort d'un plongeur. Lorsque j'avais pris connaissance de ce fait, j'étais en poste à Bort-les-Orgues, où j'ai eu le privilège d'une visite guidée de plusieurs heures à l'intérieur du barrage poids éponyme sur la Dordogne, puis du barrage en voûte mince de Vaussaire sur la Rhue : c'est impressionnant, surtout lorsqu'on songe à la masse d'eau accumulée derrière l'ouvrage.

65. Je rappelle qu'à l'époque, l'étude des crues n'était pas la priorité de l'agence Seine-Normandie : c'était même déconseillé. Il fallut attendre 1977 pour commencer à s'en préoccuper.

américains de leur époque, adeptes d'une secte probabiliste, la log Pearson⁶⁶ III. Il y a un tel foisonnement de lois de probabilités que le choix de l'une d'entre elles peut s'apparenter à un tirage au sort ou à une croyance, surtout lorsqu'on aborde l'estimation d'événements extrêmes de fréquence rare : qui a l'expérience d'observations de mille années pour affirmer que c'est la bonne loi ? Si l'on prend en compte les effets de mode, ou celui des moutons de Panurge, le regard extérieur du bédouin se trouve déstabilisé et ne sait pas où l'accrocher de façon solide et fiable.

L'avantage d'Hershfield résidait dans sa possession de milliers de données d'observations de précipitations journalières, voire horaires, amassées dès le début des années 1950. Son choix de la loi de Gumbel apparaît expérimentalement fondé.

Cependant, le Weather Bureau des Etats-Unis avait une autre approche que celle de Hershfield, hydrologue de l'USDA : celle de l'estimation de la précipitation maximum probable (PMP) qui fit l'objet d'un manuel édité par l'OMM au début des années 70. Celle-ci consiste à tracer l'enveloppe des plus fortes précipitations d'une région en supposant qu'au moins une d'elles approche le maximum que la Nature est susceptible de produire dans la région, en relation avec l'humidité des masses d'air et avec l'influence du relief. La subjectivité de la méthode fut critiquée sévèrement par nombre d'auteurs pour deux raisons essentielles. La première est que les phénomènes naturels n'ont pas de limites physiques connues. La seconde, plus terre-à-terre, est que plus la durée des observations se prolonge et plus le nombre de stations croît, plus les chances de crever la courbe enveloppe se réalisent. C'est comme dans les disciplines sportives, les records sont destinés à être battus plus on avance dans le temps, même si certains ont la vie dure. Prenons l'exemple de Paris-Montsouris : avant la Grande Guerre, la précipitation maximale quotidienne connue était de 51 millimètres. Ensuite le record est passé au niveau de 65 millimètres, après un orage d'un peu plus d'une heure. Quand j'ai pris ma retraite, cela faisait dix ans qu'il avait franchi la barre des 90 mm, suite à une pluie continue pratiquement sans interruption sur les 24 heures. Dans ces deux derniers cas il semble inutile de préciser que les conséquences hydrologiques ont été assez différentes. A plusieurs reprises, on a mesuré des précipitations supérieures à 100 mm

66. Je n'ai absolument rien contre Pearson, mathématicien remarquable de la fin du 19^{ème} siècle.

lors d'orages sur la région parisienne et à seulement quelques kilomètres du parc Montsouris, notamment au moins une fois à Montreuil. En densifiant le réseau, on a plus de chances de battre des records. Et en combinant avec la durée d'observation, cela devient inévitable.

Maintenant venons-en à la méthode du gradex. Le mot **gradex** résulte de la contraction de l'expression « **gradient** des valeurs **extrêmes** ». Je vais essayer de montrer l'apport innovant de cette méthode du gradex sans trop entrer dans des considérations ésotériques. Tout d'abord, en accord avec mon expérience évoquée dans le premier chapitre de la première partie et tirée du modèle déterministe « runoff curve number » du service de conservation des sols (SCS) des Etats-Unis, on part du principe qu'à un certain moment de saturation des sols toute la pluie ruisselle. Pourquoi cette qualification de « déterministe » ? Tout simplement parce qu'on décrit le déroulement de l'événement au fil du temps, comme un processus de cause à effet, sans situer son importance réelle par rapport aux autres, ni en déterminer sa fréquence d'occurrence. Ce peut être un modèle de prévision des débits, auquel on peut accoler un calcul de fourchette de confiance sur chaque résultat produit, et qu'on doit réactualiser au fur et à mesure, comme pour les prévisions météo. Avec le gradex, on a affaire à un modèle probabiliste pur. Son but n'est pas de faire une prévision de crue. Son objectif est de prédéterminer une crue d'une fréquence donnée. Il n'empêche que la méthode du gradex repose sur le principe que toute l'eau précipitée participe entièrement à l'écoulement à l'exutoire du bassin considéré, à partir d'une fréquence décennale ou centennale. A fortiori pour les fréquences plus rares, et la décennalléenne en fait partie. Sur ce point précis le « tout ce qui précipite forme la totalité de l'écoulement » devient commun aux deux modèles. Un autre point commun, c'est de prendre le millimètre comme unité de mesure, y compris pour les écoulements à l'exutoire qu'il suffit de rapporter à la surface du bassin. Cette façon de faire fournit un avantage supplémentaire, celui de pouvoir s'adapter à une autre surface. Un avantage décisif en faveur des données pluviométriques, outre leur faible coût et les historiques existants, c'est de pouvoir être mobilisées pour n'importe quelle surface à étudier. La station hydrométrique est associée à un bassin versant défini une fois pour toutes et ses données ne peuvent être utilisées sans risque pour l'étude d'un autre bassin.

Restent trois points fondamentaux à régler. Le premier est le choix de la loi de probabilité : c'est celle de Gumbel sur les valeurs extrêmes,

déjà employée par Herschfield aux Etats-Unis. Ne pas oublier que nous sommes en 1967 ! Julius Emil Gumbel était un juif allemand chassé par les nazis de sa chaire de mathématique en 1933. Réfugié en France dans un premier temps, il avait travaillé sur les valeurs extrêmes de débits, tout comme Fréchet qu'il avait sans doute côtoyé. Gumbel proposa une loi à décroissance exponentielle simple pour décrire les fréquences des débits maximaux et le papier graphique correspondant sur lequel on pouvait porter les valeurs expérimentales retenues après échantillonnage et tracer la courbe. Fréchet, de son côté, proposa un ajustement sur une double exponentielle. Les deux courbes, celle de Fréchet et celle de Gumbel donnaient des résultats voisins pour les valeurs les plus communes, ne dépassant pas la fréquence centennale. Au-delà, elles divergeaient énormément, la courbe de Fréchet pouvant donner des valeurs de 5 à 10 fois supérieures pour la fréquence décennale. Gumbel émigra ensuite aux Etats-Unis juste avant la guerre. En 1958, à l'université de Columbia, il publia *Statistics of Extremes* dont Herschfield s'inspira.

Le second point concerne le choix du pas de temps d'observation de la pluie, lequel est directement lié au pas de temps du déroulement de la crue. Comme la méthode s'applique avant tout sur des bassins de superficie de quelques milliers de kilomètres carrés, les pas de temps peuvent aller jusqu'à plusieurs jours : donc les relevés pluviométriques quotidiens peuvent convenir. Les observations pluviographiques deviennent absolument nécessaires pour les bassins plus petits, inférieurs à 1 000 km².

Le troisième et dernier point est la méthode d'échantillonnage des valeurs maximales de débits et de pluies. Les auteurs avaient remarqué que les pluies successives observées à un poste devenaient presque totalement indépendantes au bout de trois jours, a fortiori sur 5 jours⁶⁷. Ils en concluaient que dix ans d'observations pluviométriques de bonne qualité leur suffisaient pour constituer un échantillon de données, alors qu'il fallait cinquante ans d'observations des débits pour commencer à espérer connaître le gradex des débits. Pierre Guillot ne se privait pas de le dire et de le répéter, ce qui faisait réagir ses détracteurs. Parmi ces derniers, on trouvait des membres éminents du Comité français des grands barrages qui pensaient que la méthode conduisait dans certains

67. Par exemple, pour un poste pluviométrique donné, la hauteur de précipitations du jour j est corrélée avec celle du jour $j-1$; puis le jour j avec $j-2$; puis j avec $j-3$ et ainsi de suite. On s'aperçoit qu'avec $j-5$, le coefficient d'auto corrélation devient inférieur à 0,1 : ce qui indique aucun lien physique entre les deux séries de valeurs espacées de 5 jours.

cas à des dimensionnements d'ouvrages « déraisonnablement » coûteux. Il s'agissait bien sûr de ceux qui étaient confrontés au problème budgétaire, pas à celui de la sécurité des personnes et des biens.

Je passe rapidement sur la transformation de la pluie en hydrogramme, c'est-à-dire en courbe des débits en fonction du temps, à la sortie du bassin versant : ce n'est pas mon sujet. Pour faire simple on peut schématiser l'hydrogramme résultant de cette valeur extrême de pluie, sous forme d'un triangle traduisant le temps de montée suivi de celui de la décrue. Il peut s'agir là d'une appréciation découlant de l'examen des hydrogrammes déjà observés à l'exutoire. Ou bien ce peut être une construction totalement empirique à partir d'un triangle adimensionnel sur la base d'un temps de montée égal à un tiers et d'un temps de décrue de deux tiers. Ou un quart et trois quarts : c'est tout l'art de l'ingénieur. Le temps de montée peut être assimilé au fameux temps de concentration, déduit grossièrement de la forme du bassin versant et de sa pente. Les hydrauliciens italiens de l'entre-deux-guerres avaient acquis une grande expérience dans ce domaine lors de la construction de nombreux ouvrages d'art. J'arrête là : le reste est affaire de conversion d'unités pour obtenir le débit de pointe et le volume de la crue, ce dernier correspondant par hypothèse de départ au volume total de la pluie. Les ingénieurs chargés de la conception du barrage ont besoin de ces deux valeurs, le débit de pointe et le volume total de la crue, pour dimensionner chacun des ouvrages qui le composent. Leur travail est très concret : ce ne sont pas des chercheurs en hydrologie de surface.

J'ignore l'argumentaire théorique qui fait que la loi de Gumbel s'adapte bien aux valeurs extrêmes de précipitations et peut être employée à coup sûr. J'ai tendance à faire confiance à Pierre Guillot et à Daniel Duband. Est-ce bien raisonnable ? Un argument essentiel à mes yeux : cette loi de probabilité n'exige pas la transformation de la variable, exprimée en millimètres. Ce n'est pas suffisant. Il faut comprendre que les ingénieurs doivent se procurer une valeur de débit décennale⁶⁸ pour dimensionner un évacuateur de crue. C'est la

68. Attention : la fréquence décennale ne signifie aucunement que les ouvrages construits doivent durer très longtemps, disons plusieurs siècles. Nous avons sous les yeux les restes des ouvrages hydrauliques des romains qui avaient un grand savoir-faire. Nos barrages actuels devront être détruits partiellement ou en totalité et reconstruits. Ils sont auscultés périodiquement : le résultat de ces examens indiquera la date et la nature de l'intervention à effectuer. C'est ainsi : toutes ces constructions ont une durée de vie limitée.

raison pragmatique qui l'emporte : pas de solution extrême au problème, sinon on ne construit plus. En un sens la loi de Gumbel apparaît comme une solution raisonnable, surtout si on la compare à celle de Fréchet.

Il n'empêche qu'un certain nombre de questions se posent : ont-elles des réponses ? Tout d'abord, les statisticiens ont une exigence : celle d'avoir affaire à un échantillon d'individus appartenant à une même population. J'ai entendu ceux qui désignent sous le nom de « horsain » un individu qui visiblement n'appartient pas à la population étudiée. Le mot proviendrait du normand et qualifierait un villageois dont la famille n'est pas originaire. Cela sert de justification pour le mettre de côté et le traiter à part. Qu'en font-ils ? Que peuvent-ils faire ? Or en la matière, qu'est-ce qu'une population de précipitations ? C'est forcément un ensemble d'individus provenant d'un ensemble de situations météorologiques pouvant être fort différentes entre elles. Dans les valeurs extrêmes, le nombre de ces situations semble se resserrer à quelques cas particuliers et ceux là dépendent de la localisation géographique du bassin versant objet de l'étude. Citons par exemple : un énorme orage convectif, une ou deux tempêtes successives comme celles de 1999 sur la France, une situation de blocage des masses pluvieuses. Manifestement ces trois exemples appartiennent à trois catégories météorologiques différentes : et pourtant les trois produisent des valeurs extrêmes qui toutes doivent être prises en compte dans le dimensionnement de l'ouvrage. Comment faire ? Mélanger tous ces individus en faisant fi des préconisations des statisticiens jugés puristes pour l'occasion ? Ou bien les séparer en trois populations avec le risque d'avoir de zéro à un très faible nombre de cas observés dans chacune d'entre elles, sans compter le problème final de l'agglomération nécessaire des résultats ???

Sur papier de Gumbel, le gradex est le gradient des valeurs extrêmes, extrait de la droite d'ajustement. Si j'ai bien compris, la valeur du gradex est exprimée en millimètres. Cette grandeur est la même entre la pluie décennale et la pluie centennale, qu'entre la pluie centennale et la millennale, ou entre la millennale et la décamillennale. Ainsi, en connaissant la pluie décennale en un point et son gradex, vous déduisez la décamillennale en ajoutant 3 fois la valeur du gradex à la pluie décennale, ou 4 fois la valeur du gradex à la pluie de fréquence annuelle. C'est la cuisine d'un ignare en lois de probabilité, mais c'est pratique. Et les valeurs annuelle et décennale s'obtiennent aisément par un simple

ajustement graphique sur un papier de Gumbel après avoir classé les pluies journalières par ordre décroissant.

Toute méthode a ses limites d'application et ses créateurs ne peuvent être tenus pour responsables d'une utilisation mal conçue ou mal adaptée. Il est évident que l'appliquer sur des zones montagneuses cristallines conduit à des résultats pertinents. En revanche, l'utiliser sur des zones de plaine sédimentaire sans un luxe de précautions entraîne des conclusions aberrantes. Pierre Guillot avait pleinement conscience que le pouvoir de rétention des bassins étudiés existait : il l'estimait entre 30 et 80 millimètres, quelle que soit l'ampleur de la crue. En réalité, la seule difficulté concerne la connaissance du point d'infléchissement de la courbe d'ajustement des débits maximaux à la loi de Gumbel pour déterminer son gradex, surtout si la série d'observation hydrométrique est trop courte. Mais on peut se passer de cette connaissance pour se rabattre directement sur la pluie et son gradex.

Lors d'un événement extrême on peut penser que la sous-estimation systématique des précipitations compense largement l'ordre de grandeur estimé de la rétention potentielle en surface du bassin. Toute considération sur l'emménagement dans les nappes, qu'elles soient phréatiques ou profondes, doit être laissée de côté, puisque nous sommes dans l'examen de phénomènes portant sur des durées beaucoup trop courtes par rapport à l'infiltration. Deux exceptions. Premièrement le cas d'une zone karstique où le remplissage des diaclases peut être très rapide. Avec le risque d'un karst plein à ras bord en début de crue et de l'amorce de siphons qui vidangent les réserves, la crue peut se trouver amplifiée au-delà du seul volume de la pluie en cours. Deuxièmement ce type de crue aggravée se produit aussi dans les zones rurales semi arides où l'on a pratiqué des travaux de conservation des eaux et des sols, en construisant des banquettes de rétention totale en courbe de niveau et destinées à retenir l'eau pour alimenter les cultures. La bibliographie américaine que j'avais réunie sur ce sujet en 1963-1965, regorge d'exemples de crues aggravées après la rupture en cascade des banquettes de rétention entraînant la formation d'une pointe de crue bien supérieure à ce qu'elle aurait été sans travaux de ce type.

Une dernière difficulté concerne la variabilité du gradex des pluies sur le bassin étudié. On peut imaginer que le barrage à construire se situe à la sortie d'une zone montagneuse à un endroit où le gradex est le

plus faible et que sur le haut du bassin d'alimentation il soit beaucoup plus élevé. Dans ce cas les auteurs préconisent de travailler sur le gradex moyen du bassin. Ma question est : comment estimer cette moyenne ? Mais c'est sans doute peu important. Et bien sûr, il y eut toutes sortes de disputes homériques au sein de la commission de débits de la SHF, principalement sur les méthodes d'échantillonnage et sur le choix des lois d'ajustement : les lois de probabilités étant nombreuses, il y avait matière à polémique. Ça me fascinait.

J'ajoute un dernier mot sur la possibilité de cartographier les valeurs du gradex. Les résultats obtenus sur les pluies quotidiennes, montrent que le gradex peut se cartographier : d'après Guillot, il va de 8 mm sur l'Ouest de la France à 50 et plus sur les Alpes du Sud et même au delà de 80 mm sur les Apennins. En un sens c'est rassurant : ainsi on tient compte de la variabilité spatiale du phénomène sur un territoire : par exemple les totaux maximaux quotidiens sont plusieurs fois supérieurs entre Paris et les Cévennes pour une même fréquence d'occurrence. Avec le recul, je me demande si les auteurs ont essayé de corrélérer les différents paramètres obtenus. Par exemple la pluie de fréquence annuelle avec la valeur du gradex. Si oui, je ne me souviens pas d'en avoir eu connaissance. Si non, ça vaudrait le coup d'essayer pour étendre l'information obtenue, comme nous l'avons vu pour les totaux pluviométriques annuels. Voilà où le risque de rupture d'un barrage vient de nous amener et aurait pu nous emmener beaucoup plus loin si je n'étais pas si ignorant de quantité de choses sur ce domaine. La seule critique que je puis faire vis-à-vis de la méthode du gradex est la suivante : en fréquence rare d'un événement extrême, le volume de l'écoulement est supposé égal à celui de la pluie. Mais cette dernière n'est observée qu'à une ou plusieurs stations distantes les unes des autres. On assimile donc la pluie décamillénnale obtenue à une station, à la lame d'eau tombée sur la totalité du bassin versant étudié. Autrement dit on passe de la hauteur durée fréquence en un ou plusieurs point(s) de 400 cm² à la hauteur durée fréquence sur une surface de plusieurs milliers de kilomètres carrés. Le problème évoqué précédemment, celui des données non officielles trop souvent largement supérieures aux données des réseaux officiels, devrait nous inciter à beaucoup de prudence. Enfin un exercice intéressant serait de calculer le gradex des bassins versants où un barrage a été construit avant la généralisation de cette méthode, et de comparer le résultat avec la dimension effective de l'évacuateur

de crue. Je suppose que cela a été déjà réalisé à l'initiative du maître d'ouvrage ou du maître d'œuvre ou du Comité national français des grands barrages. On s'apercevrait qu'à défaut d'employer la méthode du gradex, les ingénieurs ont pris des coefficients de sécurité. Sur quelles bases ? Il faut toujours avoir en tête à la fois les considérations scientifiques et techniques à la base du travail des ingénieurs concepteurs et les contraintes plus ou moins malléables du budget à leur disposition. La pratique du coefficient de sécurité est une précaution heureusement assez généralisée dans les corps d'ingénieurs qui ont été confrontés à des expériences multiples.

Chapitre 17

Enregistrer le déroulement de la pluie pour en mesurer l'intensité

Parmi les exemples de très fortes intensités mesurées je me souviens d'un paragraphe lu dans l'ouvrage « *précis de climatologie* » écrit au début des années 60, par Arléry, Grisollet et un troisième dont j'ai oublié le nom. Ce paragraphe citait le chiffre de 30 et quelques millimètres, disons 32 mm, mesurés en une minute à une station des Etats-Unis. Avec quel type de capteur cette mesure avait-elle pu être effectuée ? J'avais posé la question à Raymond Arléry, qui ne savait pas. Je pris rendez-vous avec Grisollet dans son bureau d'angle du palais percé du Bardo dans le Parc de Montsouris : le bureau était encombré de documents sur lesquels étaient disposés des seaux de pluviomètres et des boîtes de conserves pour recueillir l'eau des gouttières du plafond. Le palais du Bardo, vestige de l'exposition coloniale de 1934 transplanté dans le parc Montsouris, avait trouvé un ultime emploi avant une fin de vie livrée aux chats du quartier. Je suis sorti choqué de cette visite : comment pouvait-on réserver un sort de cette nature à un homme sur le départ à la retraite et qui avait tant contribué à la connaissance de la pluie ? Imaginez le travail et l'obstination d'une vie, le dépouillement minutieux des enregistrements et les calculs manuels pour créer les fameuses courbes « hauteur durée fréquence » tellement utilisées pour le dimensionnement et les simulations de fonctionnement d'ouvrages. Je sus par la suite que le service de Grisollet devait passer de la Ville de Paris à la Météo nationale : cela reste public mais ce n'est pas la même chose. On avait attendu son départ à la retraite avant le transfert ! C'était sans compter avec la règle que tout organisme appelé à lâcher une de ses attributions applique toujours dans ces cas-là : le « larguez tout, gardez tout » que m'avait enseigné plus tard René Brémond, l'organisateur

de l'inventaire national de la pollution. C'est tout simple, me disait-il, vous larguez vos tâches au service reprenneur et surtout vous gardez les moyens pour le vôtre. Ça expliquait que la Ville de Paris, au courant du transfert prévu depuis des années, n'avait pas engagé les travaux nécessaires pour faire face au délabrement du palais du Bardo !

Grisollet ne savait pas quel type d'appareil avait pu mesurer pareille intensité aux Etats Unis, mais il m'indiqua que c'était possible avec le pluviographe à siphon et flotteur fabriqué dès la fin du 19^{ème} siècle par les établissements Richard. La station de Montsouris, qui à l'époque dépendait de la Ville de Paris, en possédait plusieurs, dont l'un avec un tambour de 24 heures, un autre de rotation tri horaire et un dernier hebdomadaire. C'étaient des appareillages surveillés toutes les trois heures, au rythme des relevés des autres phénomènes météorologiques. Chaque fois, l'observateur vérifiait l'appareil : l'entonnoir de réception et son orifice de vidange dirigé vers le cylindre muni d'un flotteur doté d'un bras armé d'un stylet inscrivant la hauteur d'eau sur le diagramme placé sur le tambour mû par le mouvement d'horlogerie. Chaque variation même minime, inférieure au dixième de mm, se voyait sur l'enregistrement. Lorsque le flotteur parvenait au haut de sa course, équivalent à 10 mm recueillis, le siphon s'amorçait et le cylindre se vidait entièrement en 4,5 secondes : nous avons chronométré le temps de siphonage avec Johansen, le successeur de Grisollet, à de multiples reprises pour faire constater cette merveille à des membres de différents groupes de travail. Les enregistrements étaient faits sur du papier à coordonnées rectilignes ce qui facilitait le dépouillement manuel, avec en abscisse le temps et en ordonnées la hauteur d'eau de pluie en mm et dixièmes, le trait vertical descendant du siphonage à 10 mm ne prenant que très peu d'espace. Faisons le calcul à partir des 32 mm en 1 minute observés dans une petite ville américaine et cité par Arléry en transposant l'observation au Parc Montsouris avec l'appareil des établissements Richard. Cela revient à dire qu'il y aurait eu 3 siphonages de l'eau contenue dans le cylindre. Compte tenu du fait que le siphonage dure 4,5 secondes⁶⁹, il y a au total une quantité de pluie de 6,75 mm qui aurait échappé à tout mesurage. Les 32 mm du départ seraient devenus 25,25 mm effectivement mesurés. Dans la réalité ce n'est peut-être pas aussi simple, mais pour cet exemple précis, ce serait déjà une sous-estimation probable

69. Avec le groupe de travail d'hydrologie urbaine, nous avons chronométré plusieurs fois le temps du siphonage, qui se révéla stable à 4,5 secondes.

d'environ 20% avec l'appareil Richard à flotteur et à siphon dont la précision m'apparaissait bien meilleure que la technologie basée sur les basculements d'augets. Avec des intensités plus faibles l'écart se réduit. Par exemple pour 60 mm mesurés en une heure, ce qui représente déjà une valeur extrême de fréquence rare pour Paris, il y a 27 secondes de siphonage (6 fois 4,5 secondes), donc une sous-estimation inférieure à 1% si l'on rapporte cette durée aux 3600 secondes, en faisant l'hypothèse d'une pluie régulière sans à coup à l'instant des siphonages.

C'était encore les années 1970-1980. En 2012 il devrait exister des solutions bien meilleures. Avec le recul, je me pose aussi la question suivante, à laquelle je n'ai pas de réponse appropriée. Le pluviographe à flotteur et siphon a été créé par les établissements Richard vers la fin du 19^{ème} siècle. Il n'a pas équipé uniquement quelques stations comme Montsouris. Il a certainement intéressé le Bureau Central de la Météorologie, qui a survécu jusqu'en 1919, mais aussi les observatoires de physique du globe et toute l'administration coloniale liée aux précédents. Que sont devenues ces archives ? Le pluviographe de Sidi-bou-Baker en Tunisie qui avait fait l'objet d'un dépouillement minutieux sous la direction de Jean-Marie Masson au CERGR de Tunis était à siphon et flotteur mais je n'en suis plus totalement certain : ce travail avait été réalisé pour calculer l'indice d'agressivité des pluies de Wishmeier.

Ma visite à Grisollet se situe avant la décision de Valiron de réaliser un réseau pluviométrique complémentaire sur le territoire de Seine-Normandie. Lorsque sa décision fut prise, il m'indiqua que son camarade Cogombles venait de liquider sa société, la SODETEP⁷⁰, laquelle avait participé entre autres actions, à la campagne d'étude de la pluie artificielle menée par les études et recherches d'EDF Chatou. Et la SODETEP possédait des pluviographes qui étaient entreposés dans les bâtiments du service des domaines à Lorient. A cet instant, je n'avais pas encore dimensionné le RPC en nombre de pluviomètres, ni a fortiori en pluviographes. J'allai à Lorient et tombai sous le charme des couleurs printanières de la lande bretonne. L'armoire des pluviographes était en zinc pour éviter de chauffer au soleil, comme les toitures, et pour limiter l'évaporation. L'affaire fut conclue avec le représentant des domaines et j'attendis leur livraison dans le 15^{ème} arrondissement, où l'agence avait son siège. Il y avait 20 pluviographes. Le déménageur les

70. Société de développement des techniques d'étude des précipitations.

avait entassés dans son camion. Lorsqu'il ouvrit la porte nous constatâmes le désastre : tous étaient cabossés, ceux du dessous étaient carrément aplatis. Ce fut l'occasion pour moi de me mettre à la recherche d'une autre solution pour le matériel pluviographique, à la fois pour l'armoire et pour le capteur. Les établissements Richard ne fabriquaient plus le système à siphon et flotteur. Avec mes collègues hydrologues, Jean-François Zumstein de Rhin-Meuse et Jacques Lefevre de Loire-Bretagne, nous étions persuadés que le capteur à augets basculeurs préconisé par la météo nationale plafonnait les intensités à 60 mm/h. Il fallait en avoir le cœur net.

J'organisai alors une réunion sur la mesure de l'intensité des précipitations avec Vitton, l'ingénieur chargé des programmes de recherche d'appareillage de mesure des différentes variables météo, et surtout Treussard, qui était le directeur du centre météo de Trappes, où les choix se décidaient. L'objet de la réunion était de convenir d'un nouvel appareil qui d'une part éviterait le bouchage ou le colmatage du trou d'évacuation de l'eau captée par l'entonnoir de réception et qui d'autre part permettrait de mieux évaluer les intensités maximales au-delà des 60mm/h. Au bout de 2 heures, nous en étions à ceci :

- Je disais avec mes collègues que le pluviographe était destiné à l'estimation de l'intensité des précipitations en effectuant le rapport de la hauteur d'eau mesurée au temps écoulé, ces deux données étant consignées sur le graphe enregistré.
- Treussard affirmait que ce n'était pas vrai.

Ce fut alors qu'il nous expliqua que le pluviographe à augets basculeurs de la société Précis Mécanique avait été conçu uniquement pour connaître le plus précisément possible la quantité d'eau tombée dans les 24 heures et totalisée à 6 h Temps Universel, de manière que les données transmises par la Météo nationale⁷¹ sur le réseau de l'OMM soient sans critique. Je comprenais enfin pourquoi le trou de vidange de l'entonnoir de réception de 2 000 cm² était alésé à 1 mm, ce qui limitait de fait l'intensité des pluies à un maximum d'environ 60 mm/h, sans compter, notamment pour les appareils gérés par d'autres services et quelquefois mal entretenus, les cas fréquents de bouchage qui se repéraient au premier coup d'œil sur l'enregistrement. Des hydrologues

71. Il s'agit des stations principales gérées par des professionnels.

avaient fait acheter ces appareils afin de procéder au dépouillement des courbes enregistrées pour connaître le déroulement de la pluie avec ses différentes intensités et réaliser leurs études sans être forcément au courant du plafonnement des intensités à 60 mm/h. En repensant aux 32 mm en 1 minute, l'appareil à augets basculeurs aurait donné le bon total, mais aurait mis plus d'une demi-heure pour l'enregistrer, ce qui donnait raison au choix du centre de Trappes pour satisfaire à sa finalité. On voit encore par cet exemple le poids de la finalité du réseau et de ses appareils de mesurage dans les résultats de l'observation. La finalité recherchée est souvent différente d'un organisme à l'autre et cela oblitère les résultats. Les dizaines d'années d'observation effectuées avec les appareils à augets basculeurs sont néanmoins exploitables, mais leur utilisation nécessite des précautions appropriées.

A l'époque, la Division Technique Générale⁷² avait bien compris le problème et trouvé une solution en alésant le trou de vidange à 3,5 mm. Mais là encore la finalité n'était pas de connaître avec précision le déroulement des variations d'intensité de la pluie, mais de réduire les problèmes liés au colmatage de ce trou. EDF-DTG complétait le dispositif par une solide armoire chauffante destinée à faciliter la mesure de l'équivalent en eau de la hauteur de neige et à éviter que le bouchage ne se fasse par gel et que la neige déposée ne soit reprise par le vent (sous-estimation accrue) : la finalité première d'EDF concernant ce mesurage est l'estimation de la quantité d'eau qui arrivera dans ses barrages-réservoirs au moment de la fonte. Comme je ne voulais pas inventer une autre solution pour équiper le réseau complémentaire, j'ai choisi celle d'EDF. Des études expérimentales sur la précision des intensités montrèrent que le capteur conçu d'après le système à auget basculeur initial spécifié par le centre de Trappes avait été rendu instable par l'alésage à 3,5 mm : c'était mieux que l'appareil d'origine pour éviter les bouchages et pour apprécier des très fortes intensités, mais loin d'être entièrement satisfaisant. Au début des années 1980, il y eut les premiers enregistrements numériques sur des cassettes magnétiques : je m'arrêterai là, n'ayant pas participé à la suite des modernisations. Notons au passage que le terme pluviographe ne convient plus et devrait être modifié en pluviomètre enregistreur, pour englober toutes les formes d'enregistrement, graphique ou numérique.

72. Son siège était à Grenoble.

Une des idées constantes des directions météorologiques a été la mise en place de stations automatiques utilisant les capteurs pluviographiques existants, dans le dessein de réduire les personnels dédiés à l'observation tri horaire recommandée dans les stations officielles du monde entier par l'OMM, pour suivre correctement le déroulement des phénomènes météorologiques et pour alimenter les modèles de prévisions du temps. Or l'entonnoir des pluviomètres doit faire l'objet d'une surveillance qui nécessite la présence humaine, à moins de changer radicalement de capteur, ce qui semble illusoire si l'on veut garder le principe du recueil de la pluie dans un récipient. Il ne faut pas tomber dans le piège d'une recherche frénétique pour changer sans arrêt de capteurs : ne perdons pas de vue la nécessité d'établir des chroniques homogènes pour modéliser sur des bases solides et pour juger les variations climatiques. Dès la fin des années 1960, la Météorologie nationale s'intéressa à l'outil radar pour observer les phénomènes pluvieux de forte intensité. J'y reviendrai.

Chapitre 18

A quoi sert l'enregistrement ponctuel du déroulement de la pluie ?

Lorsqu'il fut décidé de réaliser le RPC, je m'interrogeai sur la nécessité d'installer des pluviographes en complément des pluviomètres. La première question porta sur le nombre, puisqu'une enveloppe budgétaire m'avait été allouée. J'avais choisi le nombre de 40 pluviographes pour 350 pluviomètres. Une proportion de 1 pour un peu plus de 10 pluviomètres correspondait parfaitement au montant total du projet. De fait il y avait eu une inversion de l'ordre des questions à se poser. La première aurait dû être : « pour quel usage ? ». Comme l'agence n'avait pas un besoin précis en la matière, je me rabattis sur le besoin de connaissances générales en pensant néanmoins à trois utilisations précises dont j'avais eu connaissance précédemment.

La première concernait l'érosion des sols, évoquée précédemment⁷³ avec la construction de la station mobile d'étude de l'érodibilité des sols au CERGR de Tunis. En 1963, Jean-Marie Masson avait tiré l'essentiel de l'équation universelle de pertes de terre de Wishmeier, qui venait de paraître. Wishmeier fondait son équation à partir de 5 variables : la pente, la longueur de pente, le sol, le couvert végétal et l'indice d'agressivité des pluies. C'est cet indice qui a fait le principal apport de Wishmeier. Il est construit en calculant l'énergie développée au sol par la pluie. Il s'appuie sur une relation expérimentale réalisée aux Etats-Unis et jugée très significative, entre la grosseur des gouttes et l'intensité correspondante enregistrée. Dans la pratique cela conduit à dépouiller

73. En première partie, chapitre 2.

l'enregistrement à pas de temps d'égale intensité⁷⁴ et à additionner l'ensemble des énergies déduites. L'indice tient compte aussi de l'intensité maximale sur 30 minutes préconisée par Musgrave quelques années plus tôt. Tous les détails doivent figurer dans la thèse de Jean Marie Masson, qui a fait l'objet d'une publication par l'ORSTOM au début des années 1970. Cet exemple montre l'importance d'un appareillage adéquat pour cette finalité particulière qui n'était pas une préoccupation de l'agence de bassin en cette fin des années soixante.

La seconde utilisation concernait la connaissance des heures de début et de fin de précipitations sur un bassin pour comprendre le déroulement d'une crue. Une tentative remplie de panache fut effectuée dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle par Poincaré, l'oncle du mathématicien, sur une crue exceptionnelle de la Meuse : il avait interrogé tous les observateurs du réseau pluviométrique sur le déroulement de la pluie, ses début et fin, pour voir si la progression de la pluie du sud vers le nord pouvait expliquer la formation de l'onde de crue de la Meuse et sa propagation du sud au nord dans un bassin versant étroit et longiligne. Ce travail remarquable réalisé dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle se trouve dans les annales des ponts et chaussées.

Le troisième usage était lié à l'évacuation des pluies orageuses. Dans les années 1930, avec le développement de l'urbanisation parisienne au-delà des zones équipées par Belgrand dans le centre de Paris sous le Second Empire, les incidents avec inondations brutales et submersions dévastatrices étaient devenus fréquents. La vallée de la Bièvre, dans sa partie parisienne, fut à de nombreuses reprises, le théâtre de soulèvements spectaculaires de tampons ou plaques d'égout à plusieurs mètres de haut, sous la pression provoquée par l'accumulation rapide de quantités d'eaux pluviales ne trouvant pas d'exutoire suffisant. L'ingénieur des Ponts et Chaussées Caquot proposa alors un dimensionnement des ouvrages d'évacuation des pluies orageuses, que ce soit en réseau séparatif des eaux usées ou en réseau unitaire c'est à dire en mélangeant les deux, fondé sur l'estimation de la pluie décennale. Le travail consistait à dimensionner des ouvrages capables d'évacuer des quantités d'eau de pluies se produisant en moyenne une fois tous les 10 ans, pendant une durée estimée égale au temps de concentration du bassin versant étudié,

74. Cela conduit à une succession de pas de temps différents, l'intensité variant avec le temps. Une autre expression équivalente pour décrire ce type de dépouillement est « dépouillement à pas de temps variable ».

sans submersion des points névralgiques comprenant les surfaces bâties et infrastructures diverses. Au-delà de la fréquence décennale, on admettait une submersion temporaire se traduisant par une gêne passagère plus que par des destructions. La circulaire Caquot constituait le guide mis à disposition des ingénieurs chargés d'établir le dimensionnement des ouvrages d'évacuation des eaux pluviales. La question était de savoir comment évaluer ces quantités d'eau de fréquence décennale. Et c'est là qu'intervinrent les fameuses « courbes hauteur durée fréquence » que Grisolle réalisa à partir des données enregistrées par les pluviographes Richard à siphon et à flotteur. Comme ces appareils étaient installés dans le parc de Montsouris, c'est-à-dire au cœur de Paris et des problèmes générés par l'urbanisation, les ingénieurs les appliquèrent directement aux surfaces des bassins versants des zones à assainir en prenant le plus souvent des coefficients de sécurité dont la limite était constituée par ce que l'Etat pouvait investir dans ces équipements.

C'est à partir de 1972 que je me retrouvai impliqué à nouveau dans des études sur la pluie en plus des études hydrologiques et de faisabilité des projets de barrages réservoirs sur le bassin de l'Oise : Villers-en-Argonne sur le haut bassin de l'Aisne, Varennes-en-Argonne sur l'Aire et Origny-Sainte-Benoîte en dérivation de l'Oise à l'amont de son confluent avec le Noirrieu. Ces projets ne furent jamais concrétisés. Le RPC fonctionnait en régime de croisière depuis le 1^{er} janvier 1972 sous la responsabilité de Julien Bonnet. Les trois fascicules des cahiers techniques n° 2 de l'agence sur l'hydro climatologie étaient en cours d'édition, tout comme les premiers tomes de la monographie du bassin Seine-Normandie sur la climatologie et l'hydrologie, avec les planches correspondantes de l'atlas. Deux événements me concernant survirent alors à quelques semaines d'intervalle. L'un était la création de la section pluviométrie au sein de la SHF, que j'avais accepté d'animer, à titre bénévole comme tous les autres membres qui participaient à l'activité de cette société savante. Le second fut la série impressionnante d'orages exceptionnels sur l'Île-de-France durant le mois de juillet 1972. C'est cette dernière qui avait fait réagir Hubert Loriferne, alors directeur régional de l'équipement d'Île-de-France et président de la mission déléguée du bassin Seine-Normandie.

Loriferne s'était étonné du grand nombre d'événements décennaux et de fréquence plus rare, qui s'étaient produits en moins d'un mois avec de nombreuses submersions provoquant mort d'homme et d'importants

dégâts matériels. Il avait demandé que l'agence apporte des éléments de compréhension de ces phénomènes en vue d'une révision éventuelle de la circulaire Caquot pour construire des ouvrages mieux dimensionnés.

« Pourquoi les réseaux d'assainissement de la région Ile-de-France, calculés sur la base d'une précipitation décennale, ont-ils dû faire face à plusieurs événements décennaux ce même mois de juillet de 1972 ? ». Telle était le résumé du problème qui m'était posé. A l'époque je ne connaissais que le laboratoire d'hydrologie de l'université de Montpellier comme étant susceptible d'entreprendre cette étude, d'autant que l'équipe avait déjà travaillé sur la constitution de la banque de données pluviométriques de l'agence et en possédait une copie sur bandes magnétiques. Nous recensâmes les cas d'orages à l'origine des débordements urbains. Cette recherche nous amena ensuite à évaluer chaque surface concernée en fonction d'un seuil de hauteur de précipitations quotidiennes que notre banque contenait. L'idée sous jacente était d'essayer de se raccorder aux variables de Grisollet, à savoir « hauteur, durée, fréquence », lesquelles ne concernaient que le pluviographe de Montsouris. L'étude fut intéressante⁷⁵ mais ne donna pas de conclusion pratique sur la façon de prendre en compte la surface en vue d'une application à un quelconque bassin versant de la région Île-de-France. C'est au cours de cette étude que Johansen me confia 20 ans d'enregistrement hebdomadaire sur papier d'un appareil à siphon et flotteur, sur la bonne foi de mes casquettes d'animateur de la section pluviométrie de la SHF et du groupe de travail constitué au sein du service technique de l'urbanisme. Le dépouillement des diagrammes fut fait « à pas de temps variable » par le CEMAGREF d'Antony sur sa table à digitaliser : à notre grand étonnement, nous découvrîmes qu'il ne pleuvait en moyenne que 5 à 6% sur la durée totale de 20 ans, toutes intensités confondues, y compris les traces. Ce résultat obtenu à Montsouris, pouvait-il être étendu à l'ensemble de la France métropolitaine ? Je ne le sais toujours pas, mais je mis immédiatement à profit cette découverte en me séparant de mon parapluie dans mes déplacements parisiens, ce qui me valut quelques saucées mémorables.

Aujourd'hui avec un recul de 40 ans, je considère être passé à côté d'une chose importante. Ma surprise de 1972 venait de ce qu'on nous

75. Publiée dans le numéro spécial de la *Météorologie* « *précipitations atmosphériques et hydrologie* » en 1980.

avait inculqué au cours de nos études, à savoir le nombre de jours de précipitation sous forme de moyennes mensuelles et annuelles sur les régions françaises : tous ces chiffres tournaient autour de 50%, c'est-à-dire qu'il pleuvait grosso modo 1 jour sur 2. C'était inscrit dans nos têtes. Il suffisait qu'il tombe un dixième de millimètre pour qu'un jour passe dans la catégorie des jours de pluie. On ne fait jamais assez attention à la façon dont sont élaborées les statistiques. Or en détaillant la durée réelle de la pluie comme le permettaient les pluviographes Richard de la station de Montsouris, on aurait pu établir une chronique des durées annuelles et se rendre compte de leur variabilité au lieu de se contenter d'une valeur relative exprimée par la moyenne sur 20 ans, laquelle pourrait être différente d'une autre période de 20 ans, examiner s'il existait une corrélation avec la hauteur totale annuelle et constater les différences de durées au sein d'ensembles régionaux de plus en plus étendus.

Je me souviens avoir été convié à une ultime réunion fin avril 1975 pour mettre la dernière main à ce qui allait devenir la circulaire Loriferne en remplacement de la circulaire Caquot. En fait le problème principal, celui de l'évaluation d'une pluie décennale sur une surface déterminée a priori, n'avait pas de solution. Comme c'était le jour de funérailles de Jacques Duclos et qu'il faisait un temps superbe, j'indiquai mon choix au secrétaire de la commission et je me retrouvai dans la foule déambulant vers le Père Lachaise au rythme du Requiem de Mozart. Jacques Duclos avait apporté un sens gourmet de justice sociale au premier tour de la présidentielle de 1969, dont l'issue était pliée d'avance avec l'élection de Georges Pompidou. Il était de la génération de mon père mort un an plus tôt, celle des hommes qui avait été jetés dans les tranchées de la Grande Guerre et qui 22 ans plus tard s'étaient retrouvés face à l'Occupant et ses collaborateurs. Et en ce jour de funérailles nous vivions depuis quelques années déjà, l'amitié entre les anciens ennemis, mais pas tous, uniquement ceux à l'ouest du mur : les lois du monde intelligent sont difficilement pénétrables. En venant au Père Lachaise je me séparais de mes illusions, celles consistant à élaborer des relations pluies débits fiables, et ce, malgré l'énorme simplification qu'apporte l'imperméabilisation des sols comparée à l'extrême diversité des complexes sols végétations rencontrés dans le monde rural et à leur évolution saisonnière. La faiblesse des ingrédients concernant la pluie en était la principale raison.

Quel était le problème ? Avec Grisollet on pouvait travailler sur trois variables : la hauteur, la durée et la fréquence. Seule la surface demeurait fixée à celle de la bague de réception du pluviographe à flotteur et à siphon, soit 1200 cm². On pouvait même combiner la hauteur et la durée et calculer des intensités pour les durées préférées de l'hydrologue en associant chaque résultat à une fréquence d'occurrence, compte tenu de la longueur de la chronique d'observation de n années. Par exemple, toutes les hauteurs d'eau recueillies dans un intervalle de temps de 1 minute étaient classées par ordre décroissant. Ainsi on attribuait la fréquence annuelle à la donnée de rang égal à n . Dans la réalité c'est un tout petit peu plus compliqué, mais c'est l'esprit. Par besoin de loi statistique de probabilité : c'est de l'empirisme sur des données réellement existantes. Mais comme la surface reste fixe à 1200 centimètres carrés au droit de la station de Montsouris, nous n'avons pas les éléments pour étendre les remarquables résultats de Grisollet à la surface d'un bassin versant de 1 hectare et à fortiori supérieur à 100 kilomètres carrés.

Avec Jean-Marie Masson et ses équipiers⁷⁶ nous avons pensé utiliser les résultats de tous les épisodes pluvieux au-dessus de divers seuils de hauteur et d'en dresser les cartes puisqu'on connaissait les coordonnées géographiques de chaque station d'Île-de-France. Ainsi on avait une estimation grossière de la surface affectée au-dessus d'un seuil et une idée de la lame d'eau totale précipitée en 24 heures. Connaissant la durée des chroniques dans la banque de données, on pouvait faire une étude fréquentielle de ces événements. Avec ce système on avait trois variables : la hauteur, la surface affectée et la fréquence d'occurrence. Le problème était que nous avions une durée fixe de 24 heures et qu'en hydrologie urbaine les événements exceptionnels provoquant des crues avec submersions se produisent sur des durées beaucoup plus courtes, de l'ordre de quelques minutes à une ou deux heures, suivant la dimension du bassin versant. En outre il faut se remémorer que la densité du réseau pluviométrique est loin d'être suffisante pour estimer correctement la lame d'eau précipitée. Le « bucket survey » de Yann L'Hôte effectué en ce mois de juillet 1972 est là pour s'en convaincre, sans compter l'évidente sous-estimation provenant du capteur pluviométrique situé à 1,5 m du sol. En conclusion, l'objectif de l'étude qui était de cerner la hauteur de lame d'eau et sa fréquence décennale d'un événement pluvieux de courte durée sur une petite surface allant de quelques hectares

76. Je me souviens de madame Saurin mais pas des autres : qu'ils ne m'en veuillent pas.

à une centaine de kilomètres carrés, était quasi impossible à atteindre. La mission de procurer au groupe de travail une procédure de calcul des risques fréquentiels de lame d'eau précipitée se résumait à un échec.

Par ailleurs, je pensais – et je le pense toujours – que les ingénieurs des travaux publics de l'Etat confrontés au problème du dimensionnement des ouvrages à faire construire n'étaient pas totalement démunis. En Île-de-France ils disposaient des travaux de Grisolle et avaient l'habitude de se donner des coefficients de sécurité importants pour construire des ouvrages assez bien dimensionnés. Peu importait de savoir si cela correspondait à une crue décennale : on ne le saurait sans doute jamais. Il valait mieux se protéger au-delà si possible. Et là, intervenait l'enveloppe budgétaire, sans compter les discussions de marchands de tapis avec les responsables financiers pour la fixer. L'ingénieur pouvait toujours se tourner vers les élus locaux pour dire que le financement était insuffisant. Après ce jeu d'acteurs assez courant, cela se passait finalement bien. Aujourd'hui, c'est peut être plus dur. Je ne sais pas comment ils construisaient les hydrogrammes de crue résultant des lames d'eau estimées. La méthode triangulaire évoquée précédemment pouvait convenir : dans ces cas-là, il faut rester dans la simplicité.

Je reviens sur la période des travaux haussmanniens sous le Second Empire. Pour un ensemble de raisons très diverses, une partie du centre de Paris a été rasée et reconstruite. L'assainissement de ces nouveaux quartiers a été confié à Eugène Belgrand, par ailleurs concepteur et réalisateur des adductions d'alimentation en eau, en s'inspirant des travaux gallo-romains réalisés pour approvisionner Lutèce. Belgrand avait une grande culture archéologique et connaissait parfaitement les travaux des hydrauliciens romains. Vers 1830, il avait effectué son stage de fin d'études d'ingénieur des Ponts et Chaussées sur un chantier de construction d'un pont sur la Brenne, affluent de l'Yonne. Il avait participé à l'évaluation de la plus haute crue connue, avec un examen fouillé du terrain et complété par des entretiens de riverains, puis au dimensionnement du futur pont, lorsqu'une crue survint, encore plus exceptionnelle que celle qu'ils avaient imaginée. Je crois que cet événement vécu par le jeune Belgrand a été déterminant pour la suite de sa carrière. Comme l'argent du programme haussmannien était abondant, il conçut un réseau d'égouts vastes et destinés à évacuer les eaux vannes et les eaux pluviales vers les champs d'épandage d'Achères. Il n'oublia pas les trop pleins provenant d'orages exceptionnels qu'il a fait se déverser

aisément en Seine. Bref Eugène Belgrand était un génie. D'autres l'ont reconnu très vite : ainsi Gustave Eiffel a inscrit « Belgrand » sur sa tour, coté Champ de Mars.

A l'époque, je ne m'étais pas penché sur les problèmes de crues exceptionnelles, a fortiori pour des surfaces concernées par les réseaux d'assainissement pluvial, donc de petites dimensions, avec des temps de réponse très faibles, nécessitant des mesures de la pluie au pas de temps de la minute. En outre, je connaissais superficiellement la méthode du gradex parce que je n'avais pas eu à l'utiliser : l'agence ne se préoccupait pas des crues qui restaient l'apanage de l'Etat et des maîtres d'ouvrages constructeurs de barrages. Aujourd'hui, après réflexion, Pierre Guillot aurait été mieux qualifié que moi pour conseiller le groupe de travail : une démarche parallèle visant une application à toute la France métropolitaine aurait pu être tentée. Manifestement les données de Montsouris collent bien sur l'Île-de-France à condition qu'on leur applique un léger coefficient de sécurité. Mais dès qu'on se dirige vers les zones montagneuses ou le sud méditerranéen, les quantités ne sont plus du même ordre de grandeur. Avec le recul, j'aurais tenté de réaliser les cartes de fréquence des pluies journalières à l'aide de la méthode du gradex et d'établir un lien avec le travail de Grisollet pour descendre à des pas de temps en rapport avec la surface du bassin versant concerné et son temps de réponse⁷⁷. En restant cantonné à l'Île-de-France, l'extension aux autres régions pose d'autres problèmes compliqués à résoudre, car les courbes « hauteur, durée, fréquence » de Grisollet devraient au minimum être adaptées aux valeurs locales du gradex, ce qui suppose un recours à des valeurs expérimentales obtenues dans des conditions comparables de mesurage à celles de Montsouris, ... Enfin on retrouve le problème du passage de la pluie au débit, pour obtenir les valeurs nécessaires au dimensionnement des ouvrages : ce dernier a été abondamment traité durant les dernières décennies et de nombreuses solutions ont été trouvées pour améliorer les stockages temporaires et leur évacuation par des ouvrages appropriés et pour gérer l'ensemble du phénomène pluvieux en temps réel. Restera toujours la question du niveau de risque accepté de submersions et, in fine, la détermination de la fréquence d'occurrence associée à ce risque.

77. J'évite l'expression « temps de concentration », qui peut nécessiter de nombreux développements sans rapport direct avec mon sujet, sauf à considérer le sens de la traversée de la pluie et l'orientation des écoulements du bassin versant comme un facteur potentiellement aggravant de la pointe de crue.

Je me demande encore comment Grisollet procédait manuellement au dépouillement des pluviogrammes, à l'élaboration des données « hauteur, durée, fréquence » et surtout aux fréquentes mises à jour des nouveaux événements pluviométriques. En effet, ce sont les mises à jour qui ont toujours posé le plus de difficultés aux réalisateurs de banques de données. Avec l'automatisation de cet ensemble de procédures, les jeunes hydrologues d'aujourd'hui ne se rendent pas compte du temps de travail minutieux requis pour arriver à les constituer. A mon époque, ce travail fastidieux avait un avantage : il nous laissait du temps pour réfléchir inconsciemment, ruminer et ressasser diverses questions qui nous hantaient même durant le sommeil et qui trouvaient quelquefois une bonne formulation. Comment font-ils aujourd'hui ? Ont-ils le temps de ruminer ?

Chapitre 19

Le radar : l'approche combinée de la densité et de l'intensité

En 1977, je fus amené à utiliser la télédétection pour évaluer l'étendue des surfaces irriguées sur le bassin Seine-Normandie : l'idée était d'en estimer l'impact sur le régime des eaux. Cette expérience eut des prolongements dans ma collaboration avec le CNES, qui m'a demandé de participer à un groupe de travail pour sélectionner des projets de recherche en télédétection à partir des images LANDSAT et des simulations des futures images SPOT. Le CNES avait compris qu'il lui fallait initier des équipes de recherches à l'utilisation des données satellitaires pour l'observation de la terre, afin de justifier son programme SPOT. Lors d'une de mes visites au CNES j'avais été fortement impressionné par certaines images radar prises par un mirage IV volant à très basse altitude au dessus de la Beauce et sur lesquelles on voyait nettement les infrastructures métalliques des systèmes d'irrigation. Une équipe utilisant un radar embarqué à hyper fréquence m'avait demandé de participer à l'acquisition de données de terrain pour valider la possibilité de dresser des cartes de champs d'inondation, ce qui fut fait grâce à l'aide de Pierre Clergeot de l'université Paris-Tolbiac, un autre élève de Rougerie. Ce fut un échec, car le moindre élément métallique laissé sur le sol, une boîte de conserve ou une clôture, polluit l'image radar et la rendait inutilisable. A la commission hydrologie du Conseil supérieur de la météorologie nationale, dès 1972, j'avais écouté les communications sur l'évolution du programme Mélodi de radars analogiques de 10 cm de longueur d'onde destinés à l'observation pluviométrique, puis sur le lancement du programme ARAMIS piloté par Marc Gilet, avec des radars de 5 cm de longueur d'onde à images numérisées. Ce programme très important de la Météorologie nationale devait comporter

une dizaine de radars répartis sur le territoire métropolitain pour établir une mosaïque d'images agglomérées sur la France en attendant une extension à l'Europe avec les réseaux britannique, allemand, etc. J'en avais discuté avec le secrétaire de la SHF, le contre-amiral Constans, qui m'avait fait part de son expérience de marin : l'écran analogique du radar embarqué sur les navires de la Marine nationale discernait très bien les précipitations.

C'est cet ensemble de faits qui m'a poussé à proposer à la SHF une séance de son comité technique, sur « *radars et précipitations atmosphériques* » qui eut lieu au printemps 1983. Je ne me souviens plus comment j'ai procédé pour l'organiser, ni même de la liste de tous les conférenciers. D'emblée, il y avait eu une communication du canadien Shaun Lovejoy, qui avait utilisé les fractals pour décrire et analyser l'imagerie radar : ce fut une réussite. Quelques semaines auparavant, j'avais rendu visite à l'équipe de Gérard Floch, qui m'avait convié à une démonstration du radar Mélodi situé sur une colline de Dammartin en Goële. L'équipe de techniciens formés à l'école de la Météorologie nationale très en pointe dans l'électronique et l'informatique pour satisfaire à ses missions de télétransmission et de traitement de l'information, avait réussi la numérisation des images analogiques et avait constitué un défilement accéléré des images d'un événement pluvieux de 2 jours au début 1983, année de crues sur le bassin Seine-Normandie. C'était une première. En regardant attentivement ce montage, on distinguait une zone située à une centaine de kilomètres à l'ouest-nord-ouest et d'une étendue d'environ 50 à 100 kilomètres carrés que la perturbation avait très peu arrosée. A l'entour, il était tombé de 30 à 50 mm, d'après les relevés pluviométriques traditionnels : la pluie est vraiment un phénomène spatio-temporel discontinu ! J'aurais voulu que ce travail serve de démonstration au colloque que j'avais organisé, mais cela n'a pas pu se réaliser.

Avec Patrick David, qui gérât le radar pilote de Trappes à image numérisée, et André Bachoc qui animait l'équipe en charge de la modernisation des réseaux d'assainissement du département de Seine-Saint-Denis pour parvenir à une gestion en temps réel, nous avons mis au point une procédure de veille destinée à mettre en vigilance toutes les équipes pour effectuer les observations de terrain et à enregistrer les images radar lorsqu'un événement pluvieux important surviendrait. A l'époque il y avait encore d'énormes problèmes de stockage numérisé

d'une information aussi abondante que les images radar et il fallait gérer au mieux les capacités disponibles. Sur mon conseil, l'agence financière le déport de l'image du radar de Trappes en Seine-Saint-Denis, ce qui avait l'avantage de transférer la responsabilité de la veille, de l'alerte et de la mise en branle des procédures de gestion des réseaux d'assainissement au seul service utilisateur.

Quelques mois plus tard, le site de Dammartin en Goële fut démantelé en raison de servitudes liées au développement de l'aéroport de Roissy-Charles-de-Gaulle. Il est très difficile d'obtenir cette qualité essentielle pour comprendre les phénomènes naturels : la continuité dans les observations. Aujourd'hui en 2012, le réseau français de radars est menacé par l'implantation d'éoliennes de 150 m de hauteur qui perturberaient gravement la collecte des échos et la fabrication de l'imagerie. Voilà un bon sujet pour nos politiques : choisir entre une production d'énergie intermittente et coûteuse, et la connaissance de la pluie. C'est un choix primordial pour l'avenir de l'humanité.

Le radar montre l'étendue de la zone de pluie, son déplacement général, sa diversité d'intensité grâce à la pixellisation. C'est un autre point de vue sur le phénomène qu'il contribue à mieux percevoir. Mais il y a solution de continuité, au sens physique de l'expression, entre les appareillages de mesurage ponctuel – pluviomètres et pluviomètres enregistreurs – et l'image radar. C'est impossible de faire se succéder les deux modes pour établir une chronique homogène. Au sein de la commission hydrologie du Conseil supérieur de la météorologie, j'intervins de très nombreuses fois avec d'autres, notamment Pierre-Alain Roche, en faveur de la conservation des images radar, en priorité celles des événements pluvieux exceptionnels. Je quittai la commission en 1986 sans avoir obtenu pleinement satisfaction, mais l'idée a fait son chemin depuis, surtout avec l'énorme augmentation des capacités de stockage et d'accès aux données numérisées.

On peut penser qu'avec une bonne couverture radar du pays on pourrait cartographier les précipitations à l'instant « t ». Et ensuite, il suffirait d'additionner. On peut toujours rêver. Est-ce que le radar apporte une connaissance identique à celle du pluviomètre ? Non, loin de là. Une antenne radar balaye tout autour d'elle, à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol et avec une portée de plusieurs dizaines de kilomètres : elle repasse au même endroit environ toutes les 15 minutes. Cela

pourrait être plus court, mais guère. Autrement dit, on va comparer un total recueilli dans un récipient qui indique la hauteur en millimètres de précipitations effectivement tombée sur 400 cm², avec une mesure⁷⁸ pixellisée et surtout instantanée effectuée plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol puis répétée 15 minutes après. On a affaire à 2 types de mesures indépendantes d'un même phénomène : c'est le cas typique où une tentative de corrélation est tout à fait justifiée. Cette dernière est en général significative si l'échantillon est choisi judicieusement. Mais peut-on remplacer une mesure ponctuelle toutes les 24 heures par une ou plusieurs mesures instantanées tirées d'un ensemble de pixels ? Par ailleurs, l'image radar permet de voir ce qu'il se passe alentour du pluviomètre, sur plusieurs kilomètres, alors que le pauvre pluviomètre n'est spatialement que ponctuel. Ce sont deux types complémentaires de mesurage.

Je voyais un autre obstacle à l'idée de remplacer par le radar les pluviomètres classiques existant depuis la nuit des temps : en effet, rien de plus élémentaire que mettre un récipient pour connaître une quantité de pluie et aviser de la conduite à tenir en matière de cultures et de récoltes à venir. C'est la façon de procéder de tous les agriculteurs de toutes les sociétés développées d'avant le 21^{ème} siècle. Avec le radar, on change de paradigme. Auparavant l'agriculteur restait maître de sa connaissance de la pluie : il avait fait le nécessaire ou non, mais c'était de sa responsabilité. Avec le radar, la responsabilité repose sur l'organisation sociétale et les questions se posent : l'agriculteur a-t-il les moyens de se connecter sur le réseau radar ? N'est-il pas plus simple pour lui de continuer les relevés pluviométriques ? Est-ce possible de combiner les 2 types de mesurage en évacuant une foule d'autres problèmes tels que ceux liés à la dimension des gouttes et à la nature de l'eau, liquide ou gelée, aux échos parasites de toutes natures, à la rotation sur 15 minutes, ... ? De nombreuses équipes se sont mobilisées sur ces questions, notamment à Grenoble, celle de Charles Obled avec Dominique Creutin, qui m'avait demandé si je pouvais animer une session d'un colloque sur ce sujet : j'ai dû refuser parce que j'avais changé de projet et de métier.

78. Je passe sur toutes les phases d'étalonnage du radar qui amènent à une estimation correcte de la précipitation ; celle-là va dépendre aussi de la nature même de la précipitation (grêle, neige, très grosses ou très petites gouttes). Les facteurs d'incertitude existent et pèsent sur le résultat final.

Depuis 1986 les choses ont techniquement beaucoup évolué. Je n'ai pas continué à m'informer des résultats acquis et des questions en suspens. Cependant je viens de regarder un site sur internet qui diffuse la mosaïque d'images sur l'Europe occidentale : c'est fascinant de voir la traversée de la pluie en cours sur cette zone. On observe facilement les trajectoires suivies et les variations d'intensité. En outre c'est réconfortant d'admirer un projet abouti et totalement réussi. Je pressens que mon bricolage initial utilisant le gradient pluviométrique pourrait trouver avec l'apport du radar un moyen d'affiner le tracé des isohyètes. Cela est valable pour le présent et l'avenir, mais pas pour le siècle passé⁷⁹.

79. J'ai toujours pensé que l'hydro climatologie est une science qui repose sur le recoupement d'informations de diverses origines. Comme dans les romans policiers.

Chapitre 20

Qu'est-ce que l'hydrologie ?

1998 était l'anniversaire des 50 ans de la création du Prix Henri Milon d'hydrologie. Claude Thirriot et moi avons décidé de faire le point dans un texte non publié et intitulé : « *50 ans de Prix Henri Milon, et après ?* » Le centre d'intérêt de Claude était le mode d'attribution du Prix. Le jury étant composé d'une quinzaine de membres, comment s'établissait la décision ? Pour éclairer ce point, Claude utilisa les composantes principales sur les votes de chacun des jurés⁸⁰, au cours des dernières années d'attribution. Son but était d'obtenir de la matière pour faire travailler ses étudiants sur l'outil statistique « composantes principales » et expliquer les conclusions qu'on pouvait en tirer. Mon centre d'intérêt portait sur une question qui m'a toujours turlupiné : quel est le champ de l'hydrologie ? A l'époque, je n'avais pas encore lu les articles évoqués ci-après. Je me suis référé au rapport que Pierre Dubreuil de l'IRD avait fait sur la demande du ministère de l'Environnement. Dubreuil avait produit un schéma accordant un très vaste champ aux sciences hydrologiques, sur lequel j'étais d'accord. Beaucoup de sujets y étaient contenus, comme l'assainissement urbain, l'aménagement et la gestion de l'eau, le drainage et l'irrigation, l'érosion des sols, les matériaux transportés, solides ou dissous, etc., sujets que n'abordent ni Klemes ni Yevjevich.

Le niveau des textes soumis au comité de sélection s'est accru au fil des ans : c'était du niveau de la thèse au cours des dernières années. Cela n'avait pas été le cas au début, parce qu'il y avait peu de candidatures, mais à la fin des années 80, le comité technique de la SHF recevait

80. Les feuilles récapitulatives communiquées par le secrétariat de la SHF ont bien respecté l'anonymat des votes.

beaucoup de documents et il avait fallu se résoudre à conditionner la candidature à la thèse. Le jury avait accordé plusieurs fois ses faveurs à des travaux de géomorphologie dynamique fluviale. Chaque fois, je pensais à cette photo d'un lit majeur à sec avec des blocs de différentes tailles manifestement roulés par le cours d'eau en temps de crue : elle était montrée par un Yevjevich provocateur et demandant si c'était de l'hydraulique ou de l'hydrologie.

En fait je ne sais toujours pas apporter une définition claire du champ de l'hydrologie. A mes débuts, je m'étais rapidement familiarisé avec *L'hydrologie de l'ingénieur* de Gaston Réménieras, *L'hydrologie de surface* de Marcel Roche, *Hydrology for engineers* de Linsley, Kohler et Pauhls, puis plus tard *Hydrométrie des rivières* d'Audinet et al. Lorsque le *Handbook of Applied Hydrology* de Ven Te Chow parut vers la fin des années 1960, je me sentis complètement dépassé. Cet énorme livre consacrait plus de pages à des développements mathématiques et statistiques sur le traitement des données qu'aux problèmes rencontrés sur le terrain pour acquérir les dites données. Cela me ramenait à l'avant-propos du manuel de Marcel Roche prétendant qu'un bon hydrologue devrait inscrire en lettres d'or sur sa cheminée : « *une mesure médiocre vaut mieux qu'un bon calcul* ». Comme je n'avais pas le niveau pour entrer dans les raisonnements mathématiques du manuel de Ven Te Chow et que j'adhérais à la formule de Roche, j'ai laissé tomber. C'est sans doute une erreur, mais c'est ainsi.

Il y avait d'un côté les domaines où l'hydrologie pouvait prétendre avoir sa place et de l'autre les méthodes et outils pour réaliser des études et recherches. Sur le premier point je pouvais avoir une opinion, sur le second j'avais l'impression d'être soumis à une pensée dominante pratiquant les évitements des réalités du terrain. Or le terrain et les observations qu'on peut y effectuer m'ont toujours paru incontournables et primordiaux. C'est là que réside ma grande gêne vis-à-vis de la définition du champ de l'hydrologie, gêne d'autant plus grande que je repense toujours à ce que Cormary me déclara il y aura bientôt cinquante ans. Pour lui, l'hydrologie se résumait à la résolution de deux problèmes : celui de l'estimation du coefficient de ruissellement et celui de l'évaluation du temps de concentration. Pour le second, les hydrauliciens italiens ont rivalisé entre les deux guerres pour apporter des solutions à des problèmes concrets de dimensionnement d'ouvrages de toutes

sortes, notamment d'infrastructures routières. J'évite de faire référence au concept de l'hydrogramme unitaire qui a suscité un grand nombre de recherches et de développements mathématiques : les résultats finals ne m'ont jamais convaincu. Mais je reconnais que c'est une façon pertinente d'aborder l'hydrologie.

Le coefficient de ruissellement est tout bêtement le rapport du volume écoulé au volume précipité. Or tout ce qui précède montre à la fois la sous-estimation systématique des précipitations et notre trop faible capacité à établir la réelle valeur de ce phénomène lorsqu'il est exceptionnel. Par ailleurs le mesurage des débits auquel on ne peut pas faire une confiance aveugle, n'est effectué qu'en peu de sites et rarement à l'endroit voulu ou souhaité. La formulation de Cormary est en quelque sorte une description compacte du champ le plus réduit de l'hydrologie, sachant que l'entrée du système n'est généralement pas la préoccupation première de l'hydrologue, puisqu'elle est fournie par d'autres que lui.

Le point de vue de Vit Klemes.

Dans son long article publié en 1987⁸¹ dans le bulletin de l'association internationale d'hydrologie scientifique (AIHS), Vit Klemes dresse le constat d'une hydrologie apparaissant comme l'appendice d'une discipline déjà bien établie à l'université comme la géologie, la géographie, l'agronomie, l'hydraulique, l'ingénierie civile, etc. Bref l'hydrologie n'est pas une science autonome à part entière. La plupart de ceux qui la pratiquent ont tendance à s'enfermer sans discernement dans des procédés mathématiques ou statistiques. Ce n'est pas encore une science, car elle est réduite le plus souvent à l'utilisation de moyens, qu'ils soient techniques ou scientifiques, pour parvenir à produire un chiffre destiné à dimensionner un ouvrage en projet. *« La pensée confuse qui rend difficile la différence entre l'hydrologie en tant que science et la production d'un chiffre commode pour décider de la gestion de l'eau, conduit non seulement à une science médiocre en freinant le progrès des connaissances mais aussi en fin de compte, à une mauvaise gestion de l'eau »*. D'où la prolifération

81. « *Dilettantism in Hydrology – Transition or Destiny ?* »,

de modèles capables de coller aux rares données pour prouver leur pertinence et pour faire des extrapolations osées, voire indéfendables. Les modèles hydrologiques sont tellement nombreux et tellement faciles à pitonner sur un micro-ordinateur que c'est devenu la jungle. Il est difficile de ne retenir que ceux bâtis selon les règles de l'Art. Les ajustements de lois de probabilité font florès, bâtis sans aucune jugeote sur les échantillons fabriqués au cas par cas, les observations les composant recueillies sans se poser la question de leur appartenance à une seule et même population. Même les statisticiens s'en mêlent pour produire des modèles d'aide à la décision. Ce constat est sévère et cependant il traduit bien la réalité. Dans sa conclusion, Vit Klemes suggère d'investir dans de nouvelles méthodes de mesurage des variables hydrologiques telles que la précipitation, l'évaporation et l'humidité des sols plutôt que de continuer à extraire une information évanescence de quelques points de mesure anémiques. Il suggère aussi d'étudier la thermodynamique, la géochimie, la physique des sols et la physiologie des plantes à la place de techniques mathématiques trop pointues.

Le point de vue de Vujica Yevjevich

Il se trouve qu'en consultant internet pour me rafraîchir la mémoire sur les travaux de Vujica Yevjevich, je tombai sur un article qu'il avait co-rédigé avec Nilgun Bayraktar Harmancioglu quelques mois après celui de Vit Klemes et intitulé « Quelques réflexions sur l'avenir de l'hydrologie ». La tonalité est différente. Pour ces deux auteurs, l'hydrologie est une branche de la géophysique et son activité de recherche est consacrée à la répartition de l'eau sur les surfaces continentales et aux lois qui la régissent, en incluant tous les problèmes de qualité.

Ils distinguent « deux sortes de motivation de cette recherche :

- *les besoins de l'humanité pour le développement, la conservation, le contrôle et la protection des eaux.*
- *la curiosité humaine pour connaître, comprendre et décrire.*

Les résultats des recherches effectuées sous l'une de ces deux motivations ont toujours été entremêlés. »

Ils insistent aussi sur le fait que tout dans la Nature est assujéti à une relation de cause à effet et que les lois de conservation de masse et d'énergie s'appliquent à toutes les sciences : en conséquence, le déterminisme est l'approche philosophique dominante dans la recherche de nouvelles connaissances. En revanche, si le résultat provient des causes tellement nombreuses et multiples, on se dirige vers une approche différente, stochastique ou autre. Je passe sur les développements très intéressants sur les différentes approches possibles pour arriver à leur conclusion. « *L'hydrologie du futur ira vraisemblablement vers les trois directions suivantes :*

- (a) l'hydrologie physique progressera en comparant les concepts actuellement dominants avec la réalité physique des processus spatio-temporels ; chaque fois que des divergences apparaîtront il faudra réviser ces concepts ou en présenter de nouveaux pour faire des progrès.*
- (b) L'hydrologie stochastique avancera en s'appuyant sur une base physique de cause à effet et en justifiant chaque méthode d'extraction de l'information issue des données d'observation ou le fondement physique de chaque modèle qui décrit un processus spatio-temporel aléatoire.*
- (c) La réunion ou la fusion des méthodes déterministes et stochastiques pour analyser et décrire les phénomènes hydrologiques et leurs processus, dans des méthodes uniques combinant ces deux caractéristiques constituera une tâche à la fois stimulante et enrichissante pour les futures investigations hydrologiques et pour la recherche en général. »*

Réunir ou fusionner le déterminisme et l'aléatoire dans des systèmes complexes est dans l'air du temps, ce qui me conforte dans ma démarche de toujours : « faire un doux mélange des deux ». Une dernière précision : les adjectifs « aléatoire » et « stochastique » signifient exactement la même chose, le résultat du hasard, bon ou mauvais. Leurs différences se trouvent dans leur étymologie, l'une latine, l'autre grecque, et dans leur emploi courant : on dit « une variable aléatoire » et « un processus stochastique ».

Mon avis :

Je vous recommande d'étudier ces deux articles et d'évaluer où nous en sommes 25 ans plus tard : c'est un travail très important que je ne ferai pas vu son ampleur. Je me contente de relever une seule faiblesse dans leur contenu et qui est directement en relation avec mon sujet. Mais c'est une faiblesse importante qui concerne leur regard pas assez critique sur la pluie. Les lois de conservation de masse et d'énergie entraînent une demande de réponse aux questions suivantes :

- la masse des précipitations est-elle bien évaluée ? Ce n'est pas en appliquant la méthode des polygones de Thiessen qu'on y arrivera. Il faut dire définitivement adieu aux polygones de Thiessen et trouver autre chose rendant bien compte du phénomène « précipitations atmosphériques touchant le globe ». Quand on peut faire des erreurs énormes d'estimation des quantités effectivement tombées sur des pas de temps de l'ordre de la minute et sur des espaces plus ou moins vastes, de quelques hectares à plusieurs kilomètres carrés, tous les subterfuges utilisés ne peuvent être pertinents.
- la masse des précipitations est-elle bien conservée dans ses diverses répartitions, une fois arrivée au ras du globe ? Le mesurage de la quantité d'eau écoulée à l'exutoire du bassin versant peut donner un ordre de grandeur de l'importance des précipitations ? Cela reste limité au seul exutoire ; toutes les surfaces extérieures au bassin sont ignorées. Même à l'intérieur du bassin, nous sommes peu capables de déterminer les surfaces les plus productrices avec une incertitude réduite au minimum. Les relations pluies débits sur lesquelles tous nos espoirs ont été fondés à partir des seules observations classiques de papa, ne peuvent avoir d'aboutissement en l'absence d'une connaissance suffisamment précise de l'entrée du système. Beaucoup d'applications hydrologiques sont fondées sur l'hypothèse qu'au-delà d'un certain seuil, le complexe sol végétation devient saturé et que tout ruisselle. Cela suppose à la fois une capacité identifiée de stockage dudit complexe et des antécédents de pluie équivalents après déduction de l'évaporation. Sans parler des lois d'infiltration vers les couches profondes, ni de celles pour estimer l'évaporation. L'hydrologie, même réduite à la formule de Cormary, demeure un objet complexe.

Manifestement ces nord-américains d'adoption ignorent tout un pan de la recherche américaine. C'est celui de l'USDA, symbolisé d'un côté par Thornthwaite et ses successeurs, et de l'autre par Hershfield. Klemes rejette les extrapolations dans lesquelles on peut placer celles prônées par les auteurs du « runoff curve number », et Yevjevich s'appuie sur les pluies maximales probables (PMP) pour en extraire les crues maximales probables (PMF)⁸², ce qu'Hershfield a combattu.

Si l'on continue à n'utiliser que les données pluviométriques conventionnelles, on ne fera pas de progrès en hydrologie, tout bêtement parce que la donnée d'entrée ne peut être suffisamment précise. Il ne faut pas désespérer : l'issue viendra de nouvelles technologies de mesurage des précipitations atmosphérique pour peu qu'une équipe soit consciente du problème et s'attelle à le résoudre. Ensuite il faudra attendre quelques décennies pour y voir plus clair, après avoir constitué des chroniques fiables pixellisées. A ce moment l'hydrologie aura fait des progrès et se sera libérée d'une hydrologie reposant sur la seule utilisation d'indicateurs pluviométriques provenant de relevés classiques à un ou deux postes supposés représentatifs pour des bassins de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Et les outils statistiques réintégreront une place certes plus modeste mais beaucoup plus efficace car ils seront plus adéquats et crédibles. Ne pas oublier que faire confiance à un relevé obtenu sur 400 centimètres carrés constitue un pari audacieux, plein d'aléas non maîtrisés actuellement, mais peut-être maîtrisables à l'avenir si cet espoir est comblé. Ce qui veut dire le lancement d'un projet international pour y arriver. Ce dont le GIEC, une fois profondément rénové, devrait faire sa priorité. Outre l'hydrologie, la connaissance approfondie des échanges hydriques atmosphériques devrait entraîner d'autres avancées scientifiques. Ce qui inclut aussi la connaissance fine des précipitations sur les océans. L'hydrologie n'a pas de limites clairement établies. C'est une sorte d'objet protéiforme dont les contours examinés dans le cadre du prix Henri Milon dépendaient au moins partiellement des formations initiales de chacun des jurés et de leur expérience dans la vie professionnelle. Au niveau international on dit « les sciences hydrologiques », comme un équivalent de la Nature aux sciences économiques du monde intelligent. Bref, toutes des sciences de l'imprécis pour paraphraser Albert Moles l'auteur d'un ouvrage éponyme.

82. Probable Maximum Flood

Chapitre 21

Les bilans hydriques et hydrologiques, de la case lysimétrique au bassin versant

Je vais examiner ces questions apparemment simples, en essayant de me faire l'avocat de la diversité des points de vue, lesquels dépendent en premier lieu de la surface considérée, en second lieu de la finalité et en troisième de la méthode utilisée. Auparavant je vous donne rendez-vous avec l'excellent article de Claude Cosandey rédigé en 1996 pour le CNFSH⁸³. Elle aborde le sujet en passant en revue les définitions parues dans différents ouvrages français et je la cite : « *dans tous les cas c'est l'aspect comptable du terme bilan qui prévaut en hydrologie, que ce soit au niveau des bilans hydriques ou hydrologiques. Trop souvent confondus, ces deux termes sont bien replacés dans leurs domaines respectifs par le Larousse Encyclopédique : le bilan hydrologique se situe à l'échelle du bassin versant et concerne une démarche hydrologique, le bilan hydrique se situe à l'échelle de la plante et participe d'une démarche agronomique* ». Et elle en déduit la définition proposée suivante :

« *Simplees opérations comptables, bilan hydrique et bilan hydrologique visent tous les deux à établir le budget entre les entrées et les sorties en eau d'une unité hydrologique définie pendant une période de temps donnée* ». Je vais agrandir le sujet et nous irons de la surface la plus petite, la case lysimétrique, à la plus vaste, celle du ras du globe.

Il y a un peu plus de 40 ans, je rendis visite au centre de l'INRA de Versailles où étaient faites les observations sur cases lysimétriques

83. Je viens de le découvrir bien tardivement sur internet : <http://hydrologie.org/glu/FRDIC/DIC-BILAN.HTM>.

dont la finalité était de mieux comprendre le comportement de certaines plantes promises à une culture intense qu'il fallait rationaliser. Les entrées, pluie et éventuellement les apports complémentaires en irrigation et en intrants, fertilisants ou phytosanitaires, étaient bien mesurés. Comme l'expérimentation portait sur une surface totale réduite d'un ensemble de quelques cases, il n'y avait pas de problème particulier lié à la variabilité spatiale de la pluie : le pluviomètre enregistreur pouvait être considéré comme représentatif. Les volumes infiltrés et percolés étaient récupérés à la base de la case. L'humidité du sol était mesurée périodiquement. Restaient l'eau évaporée en surface du sol, l'eau transpirée par la plante et l'eau de constitution que la plante emmagasinait pour sa croissance : cela était l'affaire des chercheurs agronomes. La seule difficulté technique relevait de l'effet de parois ou de bordures des caisses qui délimitaient les cases : c'était le siège d'écoulements préférentiels difficiles à cerner. C'est un cas simple de mesure de la pluie, à condition de mettre la bague de réception assez près du sol pour réduire la sous-estimation liée à l'emprise du vent. L'intérêt des chercheurs en agronomie porte essentiellement sur la durée de vie de la plante ou du végétal. Font-ils un bilan hydrique sur l'année, civile ou autre ? Je ne sais pas.

Dans le cas des parcelles expérimentales du Djouggar⁸⁴ qui était réparties sur une surface totale d'un demi-hectare, les bagues de réception du pluviomètre et du pluviographe étaient à 1,5 m du sol. On cumulait la sous-estimation liée à l'effet du vent et un début de variabilité spatiale. La finalité de l'étude était de constater l'effet des façons culturales sur le ruissellement et l'érosion des sols. Il y avait un ensemble d'une dizaine de parcelles de différentes longueurs de 10 à 40 m, disposées dans le sens de la pente, avec les 3 types de façons culturales suivants : labour dans le sens de la pente, labour en travers de la pente et simple grattage en travers qui laissait les débris organiques en surface du sol et que les agronomes américains dénommaient le « stubble mulch ». En aval de chaque parcelle était disposée une gouttière qui récupérait les eaux de ruissellement chargées de terre. Le surplus débordant de la gouttière était dirigé vers un partiteur de débit à fentes dont le nombre dépendait de la longueur de la parcelle⁸⁵. Le débit d'une fente était capté

84. Sur le versant nord de la Dorsale tunisienne.

85. De mémoire, 7 fentes pour la plus petite longueur et 11 pour la plus grande. Le volume de la cuve était doublé pour la plus grande. La fente pouvait avoir une largeur de 2 cm.

et conservé dans une cuve. Pour chaque épisode pluvieux, le volume total ruisselé correspondait au volume mesuré dans la cuve multiplié par le nombre de fentes auquel on ajoutait le volume resté dans la gouttière. Le poids total de terres emportées par le ruissellement faisait l'objet de deux mesures distinctes. La première concernait le débit solide évacué hors de la gouttière, en multipliant le débit liquide par la concentration en matières en suspension. La seconde portait sur l'évaluation du poids de terre restée dans la gouttière, d'après un protocole préétabli. En dehors du fait que le labour dans le sens de la pente était à l'origine des plus forts volumes ruisselés et de terres emportées, l'expérimentation a permis de focaliser sur l'importance des événements pluvieux exceptionnels. Ainsi l'épisode pluvieux des 30 et 31 octobre 1964 de 220 mm en moins de 24 heures, explique à lui seul 99% des départs de terre sur l'ensemble de la période d'observation, d'où un intérêt manifeste pour mieux cerner la fréquence de ce genre d'événements comme on l'a vu précédemment avec la méthode du gradex pour une autre finalité. Dans le cas de cette expérimentation, c'est surtout le coefficient de ruissellement qui était l'objectif visé, pas le bilan hydrologique, qui aurait entraîné des considérations sur l'évaporation et l'eau stockée dans le sol. Le simple rapport du ruissellement R sur la pluie P est le coefficient de ruissellement. R et P sont réellement mesurés. En se focalisant sur le coefficient de ruissellement calculé pour chaque événement pluvieux, on évacue les autres termes de l'équation classique du bilan hydrologique, l'évaporation et le stockage dans le sol. Là encore, il y avait un problème technique lié aux bordures des parcelles : en effet la délimitation reposait sur un ajustement de plaques successives dans le sens de la pente qui évitait au ruissellement sur la parcelle d'en sortir. En revanche, ce dispositif de délimitation n'excluait pas totalement l'entrée d'eau parasite provenant de l'extérieur de la parcelle. C'est sur le terrain qu'on le constatait, auquel cas il fallait éliminer ou mettre de côté les résultats correspondants. Ici l'effet de bordure est d'un autre type que celui des cases lysimétriques.

Le calcul du coefficient de ruissellement était encore la méthode appliquée pour les trois petits bassins versants expérimentaux du Djouggar. Le premier, d'un kilomètre carré, était cultivé dans le sens de la pente et réagissait rapidement à chaque épisode pluvieux, surtout lors des fortes intensités sur de court laps de temps. Le deuxième, légèrement inférieur au kilomètre carré, était cultivé en courbes de niveaux,

avec des banquettes de rétention de l'eau. Il produisait manifestement beaucoup moins de ruissellement que le premier. Le troisième, de 60 hectares, était entièrement couvert de pins d'Alep et produisait encore moins de ruissellement. L'appareillage de mesure des débits⁸⁶ était tout à fait adapté à la situation. Ce dispositif, et je ne m'en aperçois que maintenant en y réfléchissant à nouveau, péchait trop fortement par l'insuffisance de la connaissance de la pluie. Cette dernière n'était mesurée que par le pluviographe des parcelles expérimentales. Ces bassins versants expérimentaux étaient distants de plusieurs kilomètres, sur trois axes bien différents en partant du pluviographe. Aujourd'hui je pense que le bassin forestier était bien moins arrosé. Cela mériterait un retour sur les lieux. L'évaluation du coefficient de ruissellement chère à Cormary, se trouvait fortement entachée d'erreur. Alors que dire d'un bilan hydrologique devenant par construction, forcément insincère ?

Je passerai très rapidement sur le calcul du bilan hydrologique d'un bassin versant hydrographique ou d'un bassin d'alimentation d'une nappe souterraine, pour relever les nombreuses sources d'incertitude qui en font un exercice aussi difficile que la détermination du déficit d'écoulement qui était à la mode avant la Seconde Guerre mondiale. Repartons de l'équation du bilan hydrologique d'un bassin versant quelconque pour en examiner les différents termes :

$$Q = P - E \pm \Delta S \text{ où}$$

- Q est le volume écoulé à l'exutoire,
- P est le volume des précipitations,
- E est le volume évaporé,
- ΔS est la différence de volume stocké en surface, dans le sol et dans le sous-sol.

Tous ces volumes sont constatés entre le début et la fin d'une même période observée. Simplifions l'équation en faisant abstraction de la surface du bassin et en raisonnant uniquement sur les lames d'eau annuelles, écoulée, précipitée, stockée et évaporée, toutes exprimées en millimètres. Si le site de la station de jaugeage a été bien choisi, la mesure du débit à l'exutoire pose peu de problèmes de précision en

86. un Parshall pour le bassin en culture mécanisée traditionnelle, un déversoir triangulaire surmonté d'un rectangulaire pour le bassin forestier, et deux Parshall emboîtés sur le bassin en conservation des eaux et du sol.

moyennes eaux. Les plus grosses difficultés se situent à l'étiage, dont le volume pèse peu au regard du volume total sur l'année, et en période de crues exceptionnelles. L'estimation du volume total écoulé n'est pas exempte d'erreurs, mais ces dernières restent faibles. Sur une durée de 30 années, ΔS devient quantité négligeable, proche de zéro. La difficulté provient surtout des deux autres variables, la pluie et l'évaporation qui restent étroitement associées au niveau de chaque complexe sol végétation. Plus le bassin versant est grand plus la variété de ces complexes en type et en surface plus ou moins importante devient innombrable. Pour bien faire, il faudrait connaître la lame précipitée sur chaque surface et la réaction du type de complexe sol végétation en terme d'évaporation. C'est en quelque sorte analogue à la construction du modèle « runoff curve number » évoqué précédemment. Dans les faits on part d'une évaluation plus ou moins précise de la lame d'eau précipitée sur l'ensemble du bassin versant et on se raccroche à une formule de calcul d'évapotranspiration pour évaluer la dernière variable parce qu'on ne sait pas la mesurer. Entre temps on va ajouter de la complexité en faisant intervenir la transpiration des végétaux, alors que seul le pouvoir évaporant de l'air au contact du sol est à prendre en compte.

L'établissement du bilan d'une nappe d'eau souterraine dépasse mes compétences. Je me contenterai de noter trois types de nappes rencontrées sur Seine-Normandie. Le premier est représenté par la nappe de Beauce, dont l'évolution est interannuelle et qui est à cheval sur Seine Normandie et Loire Bretagne : la montée de cette nappe ou sa descente vers l'étiage peut mettre deux à trois années. Donc il est impossible de faire un bilan annuel avec une différence de stockage ΔS tendant vers zéro. Le second type à variation annuelle correspond aux différentes nappes réparties sur l'auréole géologique du crétacé formée de la craie. Le troisième, la nappe de l'albien, a la particularité d'être artésienne. Son temps de renouvellement est très long. Une nappe fait l'objet de mesures piézométriques⁸⁷ qui nous renseignent sur son niveau et l'évolution de celui-là au cours du temps. Différentes caractéristiques hydrodynamiques permettent d'évaluer son volume et son temps de renouvellement, notamment par des essais de pompage. Son bassin d'alimentation peut correspondre à une auréole géologique comme dans le bassin parisien, être à cheval sur plusieurs bassins hydrographiques ou à l'intérieur d'un bassin. Lorsque le bassin hydrographique comporte

87. En fait ce sont des mesures de pression hydrostatique.

une partie d'une nappe à cheval, son bilan hydrologique peut être affecté. La réalimentation d'une nappe provient essentiellement des précipitations qui s'infiltrent et percolent à travers un ensemble plus ou moins disparate de couches empilées, perméables à des degrés divers. Sa décharge est fonction du niveau d'étiage des rivières qu'elle alimente et des forages qui la sollicitent pour de l'irrigation et pour l'alimentation en eau potable. Il y a 40 ans, les lois de tarissement pour décrire la décharge d'une nappe semblaient assez fiables pour avoir un ordre de grandeur précis des volumes sortants. Une connaissance précise des précipitations est nécessaire mais elle n'est pas suffisante : il faut déterminer la part qui parviendra à la nappe après évaporation. C'est l'évaluation de cette dernière qui est très complexe, car en dehors de la simple évaporation au ras du sol déjà difficile à estimer, il y a la végétation dont les racines pompent une partie de l'eau infiltrée pour son développement et pour sa transpiration sous forme de vapeur d'eau captée ou non par l'air ambiant. Une preuve de cette complexité réside dans le nombre très élevé de formules pour la calculer en priorité à partir de la température de l'air, et aussi d'autres variables météorologiques comme la vitesse du vent, l'humidité de l'air, etc. La nature du sol et sa capacité de rétention après infiltration, le stade de développement de la végétation sont aussi des facteurs à prendre en compte,...

Chapitre 22

Le bilan hydrique global, du continent au globe entier

Tous les cours sur le cycle global de l'eau font référence aux tableaux produits par Baumgartner et Reichel (a) en 1975 et plus récemment par le russe Shlikomanov⁸⁸ (b) en 1993. Les résultats recueillis sur internet sont résumés ci-après, d'après le cours de J. J. de Vries, professeur d'hydrologie à l'université libre d'Amsterdam sur *Le cycle global de l'eau*.

Zone considérée	continents		océans		globe	
Surface en millions km ²						
unités	milliers km ³	mm	milliers km ³	mm	milliers km ³	mm
(a) Baumgartner et Reichel						
précipitations	111	746	385	1066	496	973
évaporation	71	480	425	1176	496	973
écoulement*	40	266	40	110	-	-
(b) Shlikomanov						
précipitations	119	800	458	1270	577	1131
évaporation	72	487	505	1400	577	1131
écoulement*	47**	313	47**	130	-	-

* cette ligne écoulement signifie une sortie des continents égale à l'entrée dans les océans.

** bizarrement Shlikomanov indique 44,2 dans son article de 1993 retrouvé sur internet : quelqu'un a-t-il fait une erreur de recopiage, reprise par les copieurs ultérieurs ?

88. *Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS) ; Hydrological Cycle – Vol. II – World Water Balance – I.A. Shlikomanov*

Ces tableaux sont à rapprocher de celui que j'avais extrait du *Handbook of Meteorology* de 1945, concernant les travaux de Wust⁸⁹.

En 1922, Wust estima le bilan hydrique mondial et parvint aux résultats suivants :

Océans

Evaporation totale sortie des océans : 334 000 km³ par an

Précipitations totales sur les océans : 297 000 km³ par an

Ruissellement superficiel provenant des continents : 37 000 km³

Continents

Précipitations totales sur les terres émergées : 99 000 km³ par an

Evaporation totale en provenance des terres émergées et des eaux continentales : 62 000 km³ par an

Source : Handbook of Meteorology (1945) page 740 qui cite l'article de Wust

A part l'inflation des chiffres entre 1922, 1975 et 1993, les ordres de grandeurs des rapports entre les différentes rubriques vont dans le même sens et sont assez voisins. Est-ce que ce sont les mesures qui se sont affinées avec le temps ? Je n'en sais rien et j'ignore tout des méthodes utilisées. Un fait remarquable se dégage de tous ces tableaux : c'est la stricte égalité entre l'évaporation et les précipitations. Tableau par tableau, on ne sait pas sur quelle durée leurs résultats ont été établis. L'absence d'une quelconque variation autour de chacune des valeurs de ces bilans globaux m'entraîne à supposer qu'il s'agit de calculs purement déterministes effectués par des astrophysiciens. Shlikomanov indique qu'il a détaillé ses calculs pour toutes les régions du globe dans un autre ouvrage. Sur la méthode utilisée, je crois en avoir obtenu un aperçu au cours des échanges effectués en 2000 sur le site de médiaterre. A l'époque, Yves Lenoir avait lancé une tribune « sur l'une des perturbations écologiques

89. En 2000 j'étais intervenu sur le site « médiaterre » qui débattait du changement climatique. Ce texte est resté dans mon ordinateur : j'ai pu y accéder facilement et retrouver le tableau de Wust. Dans ce qui suit, j'ai repris des passages de mon intervention.

et climatiques majeures que l'homme exerce sur l'environnement : l'évaporation anthropique de quantités croissantes d'eau ». Dans la discussion était intervenu André Salaün, qui présentait les estimations suivantes : « Dans le bilan thermique de la terre, la chaleur de la terre est estimée en moyenne à 200 kilojoules par cm^2 et par an. Cette chaleur latente correspond à une quantité d'eau évaporée par an par l'ensemble de la planète de $420\,000\text{ km}^3$, à comparer aux 2000 km^3 d'eau évaporée par les surfaces irriguées, ce qui représente 0.48% de l'eau évaporée ». On se retrouve avec une nouvelle estimation du volume annuel évaporé, légèrement plus forte que celle de Wust. Qui a raison ? Ce qui est intéressant, c'est que l'on fait appel au bilan thermique pour effectuer le bilan hydrique global. Il s'agit donc d'un point de vue d'astrophysicien fondé vraisemblablement sur la constance du rayonnement solaire, ce qui explique l'absence de variation du bilan hydrique d'une année sur l'autre. Et André Salaün conclut dans la foulée : « l'irrigation ne peut avoir un effet notable sur le cycle naturel de l'eau et ipso facto sur le climat global de la planète. » Or André Salaün rapporte l'eau évaporée due à l'irrigation au total de l'eau évaporée depuis le globe tout entier, soit $420\,000\text{ km}^3$ au lieu de les rapporter à l'écoulement issu des continents.

Or, c'est sur le terme ruissellement ($37\,000\text{ km}^3$ par an) que sont prélevés les $2\,000\text{ km}^3$ par an d'eau évaporée par irrigation. Et de ce point de vue le rapport passe nettement au-dessus de 5% : nous sommes dans le cadre du bilan hydrologique des terres émergées et non plus dans celui du bilan hydrique de l'atmosphère. Je me souviens de la contribution orale de Jean Margat à la commission eau du Commissariat au Plan, dans laquelle il mentionnait le chiffre de 4000 km^3 d'eau évaporée supplémentaires en provenance des continents en englobant les surfaces irriguées et les surfaces des lacs artificiels créés par l'homme. C'était à l'automne 2000. Avec le chiffre de Margat on passe légèrement au-dessus des 10%. Ce n'est plus du tout marginal. Que le Colorado soit pratiquement à sec lorsqu'il passe la frontière des Etats Unis, que le Nil ou le Fleuve Jaune aient perdu beaucoup de leurs débits à leurs embouchures respectives, il n'y a là que des faits incontestables et, semble-t-il, liés directement à l'accroissement des activités humaines. Comme le développement des retenues artificielles et des surfaces cultivées soumises à irrigation est incontestable sur ces bassins, on incriminera davantage un accroissement de l'évaporation, plutôt qu'une diminution des précipitations, sous réserve d'un minimum de vérifications. En France même, on

constate un accroissement du linéaire et un accroissement de la durée des assecs de têtes amont de cours d'eau, dans les zones de développement de l'irrigation, notamment dans sa partie septentrionale, principalement là où la pluviométrie annuelle est la plus faible (la Beauce par exemple). Voilà du grain à moudre pour les chercheurs !

Il existe une autre façon d'aborder le bilan au ras du globe. La méthode précédente est fondée sur les bilans thermiques tirés du rayonnement solaire. Imaginons une autre évaluation au ras du globe entier qui reçoit les précipitations et subit l'évaporation. Posons l'équation suivante en reprenant la conclusion sur l'égalité entre les lames d'eau évaporées et précipitées : $E = P \pm \Delta S$, où ΔS est la différence de stockage dans l'atmosphère. Sur 30 ans ΔS est égal à zéro et l'évaporation est égale aux précipitations, le tout étant exprimé en millimètres. Cette façon d'opérer directement sur les bilans hydriques permet de s'affranchir de l'intermédiaire thermique et de situer le stockage et déstockage de l'eau dans la seule atmosphère. Sur une seule année, ΔS est déjà voisin de zéro, car le volume d'eau contenu dans l'atmosphère est très réduit si on le compare au volume évaporé au cours d'une année. Le chiffre donné par de Vries déjà cité est de 15 500 km³. D'autres estimations indiquent 13 000 km³. Toutes sont statiques et ne prennent pas en compte les flux d'entrées et de sorties. Mais il faut toujours partir de ce type d'estimation statique : c'est un point de passage obligé, nécessaire mais insuffisant.

Les tableaux précédents consignent des évaluations statiques comme les volumes annuels d'évaporation à l'échelle du globe. Egaux à ceux des précipitations, ils passent de 396 000 km³ (Wust) à 577 000 km³ (Shlikomanov). En partant de ce dernier chiffre on peut déduire un flux « entrée sortie » moyen quotidien de 1581 km³, soit 10% du volume du total d'eau de l'atmosphère. Très vraisemblablement ces flux quotidiens varient largement d'un jour à l'autre et d'une région du globe à l'autre. Quelle est la part des cycles quotidiens et saisonniers, des phases lunaires et des autres cycles de plus longue durée ? Quelle est celle de l'aléatoire ? Reste le point crucial à l'ordre du jour de ce début de ce 21^{ème} siècle : l'existence ou non d'une tendance au réchauffement lié à la seule production du dioxyde de carbone en surface du globe. Si le fait est avéré, on devrait logiquement constater une tendance à l'accroissement des flux « entrée sortie » de l'atmosphère qui aurait un effet rétroactif négatif sur ledit réchauffement par dissipation de l'énergie

produite par l'augmentation de l'effet de serre. Encore faut-il ne pas se focaliser sur le seul dioxyde de carbone ! Les changements affectant directement la surface du globe sont d'une autre nature et tout aussi importants sur les terres émergées et aussi sur les océans qui emmagasinent des déchets de toutes sortes en volumes croissants. Pour être plus complet il faudrait prendre en compte les flux d'énergie échangés avec le centre de la terre, dont la manifestation la plus visible est le volcanisme : là je perds totalement pied tant mon incompetence est extrême. Tout ce qui précède sur les flux et les variations de stocks n'est qu'hypothèses et me fait penser au texte éclairant de Joël de Rosnay « *le macroscope* » que j'ai parcouru naguère et qui a disparu de ma bibliothèque : je vous le recommande⁹⁰.

Revenons aux bilans établis par les astrophysiciens. Ce sont manifestement des bilans thermiques transformés en bilans hydriques. Que cette évaporation soit fondée sur le fait que l'évaporation de 1 gramme d'eau à 15°C nécessite 2440 Joules⁹¹, et que son estimation prenne ou non en compte les conditions dépendant d'autres facteurs, tout cela ne change rien sur le fond : les bilans hydriques exposés par les astrophysiciens sont tirés directement des bilans thermiques, sous des conditions définies de lois physiques connues et précises. Et j'en viens au fait que dans la construction des bilans thermiques il y a forcément des lieux de stockage et de déstockage qui n'apparaissent pas dans le décompte final des bilans hydriques. Cette omission a pour conséquence de produire des valeurs constantes en relation directe, de cause à effet, avec la constante solaire. Or ces stockages et déstockages sont très importants en masses, sur des périodes plus ou moins longues, pouvant se révéler plus longues qu'une vie humaine. Pour ces lieux on pense surtout aux masses océaniques. Il en existe aussi vraisemblablement sur les continents, peut-être moins décisifs. C'est principalement le jeu de ces stockages et déstockages thermiques qui entraînerait la variabilité des masses évaporées et précipitées d'une année sur l'autre, variabilité que l'on ne connaît pas par manque de méthode de mesure. Les masses océaniques, délimitées par les continents, sont animées d'un mouvement de rotation⁹² dans le sens des aiguilles d'une montre en hémisphère nord, et inversement

90. Il existe bien d'autres ouvrages pouvant apporter un éclairage intéressant sur l'analyse des systèmes complexes. Je pense notamment à « *la théorie du système général* » de Jean-Louis Lemoigne.

91. De Vries déjà cité, page 7.

92. C'est la force de Coriolis qui en est la cause.

au sud : il y a déjà des transferts et des échanges thermiques en surface et à l'intérieur de chacune d'entre elles. Tout cela influence forcément les mouvements de l'atmosphère. Du déterminisme initial figé dans une approche statique des phénomènes on arrive à des processus stochastiques complexes incluant les flux et les stockages déstockages et où il devient difficile de s'y retrouver.

Shlikomanov et ses équipiers russes sont parvenus à la conclusion que le bilan global se traduit par l'égalité entre l'évaporation et les précipitations⁹³ : leur raisonnement focalisé uniquement sur les réactions de la surface du globe aux effets du rayonnement solaire semble avoir omis le rôle de l'atmosphère. Leurs travaux demeureront fondamentaux pour la compréhension des réactions des différentes parties du globe, tout en gardant à l'esprit que le principal résultat réside dans la démonstration de cette égalité entre évaporation et précipitations à l'échelle du globe.

On voit tout l'intérêt de bien connaître les précipitations sur toute la surface du globe. Cela ne signifie pas que sur chaque région identifiée du globe l'évaporation est égale aux précipitations : ce serait trop simple et ne correspondrait pas du tout à la réalité observée parce qu'il existe des transferts de deux sortes, thermiques et hydriques, par le truchement de l'atmosphère. Nous arrivons à mesurer les précipitations, mais il reste énormément de progrès à faire, notamment sur les océans mais aussi sur les continents. Nous pouvons estimer indirectement l'évaporation au moyen de formules dont on ne connaît pas suffisamment le bien-fondé et dont l'application est très localisée, en relation avec la nature de la surface étudiée (plan d'eau, complexe sol végétation, roche nue, glaciers, ...). Je suggère que les efforts de la recherche portent principalement sur le mesurage précis de ces deux variables à la surface du globe tout entier : il s'agit de lever certaines incertitudes sur l'avenir de l'humanité. Voilà un beau défi pour le GIEC.

93. C'est ce qu'il ressort de la dernière équation notée (6) dans l'article déjà cité.

Chapitre 23

Les passagers de la dernière traversée

Durant toutes les pages précédentes, à aucun moment je n'ai évoqué les matières que transporte l'eau des précipitations sous ses différentes phases, liquide, gazeuse ou solide. Dans la section pluviométrie de la SHF la question ne fut abordée qu'une seule fois à notre séance de 1984, la dernière. C'était Madame Loye Pilot qui avait rapporté les résultats de ses analyses sur la qualité de l'eau de pluie en Corse. Il n'y avait rien d'extraordinaire en ce sens qu'on y trouvait surtout des sels provenant de la mer voisine. Mais c'était un début prometteur, même si à l'époque on ne trouvait que les traces de ce que les méthodes d'analyse permettaient de trouver. A condition de savoir ce que l'on cherchait. Par exemple on ne pouvait pas trouver du lindane dans l'eau de rivière si l'on se contentait de rechercher les nitrates : il fallait des protocoles spécialisés d'investigation. J'espère que depuis cette époque, on peut découvrir toutes sortes de choses sans forcément avoir une idée précise de ce que l'on recherche.

Je ne sais pas s'il existe une synthèse de toutes les recherches dans ce domaine, mais je me souviens :

- du césium 137 provenant des explosions atomiques atmosphériques depuis 1945, utilisé comme traceur pour comprendre la circulation de l'eau dans le sol et la réalimentation des nappes profondes,
- des pluies acides sur le Canada en relation avec les industries de la région des grands lacs américains à la fin des années 70,
- des analyses de métaux lourds contenus dans l'air parisien à la fin des années 90.

Il y a quantité d'autres types de molécules et de particules : en a-t-on fait l'inventaire, avec les zones d'émission, celles de stockage ou d'atterrissage et les remises en circulation ? Pour le CO₂ cela semble fait, mais pour les autres ?

La traversée de la pluie participe à un vaste nettoyage de la basse atmosphère. L'eau est dotée d'un extraordinaire pouvoir de mise en solution. Sa molécule présente beaucoup d'autres propriétés sous ses différentes phases, capables de mobiliser énormément de particules en suspension. D'où l'intérêt de mieux connaître les trajets des molécules d'eau évaporée, des précipitations et de ce qu'elles contiennent pour bien évaluer les quantités de matières enlevées et déposées sur le globe. Et aussi le renouvellement et la réutilisation des molécules d'eau dans ce cycle « globe atmosphère globe » : certaines sont peut-être sollicitées plusieurs fois par an et d'autres laissées au repos durant des millénaires !

Tout cela sans omettre les micro-organismes tels les bactéries et virus, les pollens et autres particules facteurs d'allergies : la pluie rince la basse atmosphère et contribue à une meilleure qualité de l'air. Pourtant à l'heure actuelle, on imagine mal que la pluie puisse être partie prenante de très nombreux programmes de recherches en matière de santé.

Chapitre 24

Conclusion générale sur la traversée de la pluie

Résumé succinct de ce qui précède

Malgré tous les défauts des relevés pluviométriques effectués depuis le début des observations, les totaux annuels contiennent une partie aléatoire très importante se manifestant de même manière sur de très vastes zones. Le résultat obtenu sur le bassin Seine-Normandie en 1967 montrait l'intérêt des chroniques de totaux pluviométriques annuels pour appréhender les fluctuations des ressources en eau dépassant largement la durée de la vie humaine. En 1981, le travail de Petit Renaud montrait que ces fluctuations affectent de la même manière toute la zone de l'Europe proche de l'Atlantique. On peut imaginer que le globe tout entier est affecté par des fluctuations diverses et différentes dans l'espace et dans le temps. Récemment j'ai vu sur ARTE deux documentaires consacrés à la fin de civilisation. L'un relatait la fin de l'ère des Pharaons, l'autre le délaissement du site d'Angkor par les princes Khmers : dans les deux cas les archéologues faisaient l'hypothèse d'un changement climatique diminuant fortement les ressources en eau. Je ne connais pas les arguments de ces équipes de recherche, mais leurs conclusions sont troublantes. Les campagnes médiatiques incessantes concernant le changement climatique et ses conséquences amènent à s'interroger sur le bien fondé du résultat proclamé par la conférence de Villach en 1986 : l'activité humaine produit de plus en plus du dioxyde de carbone, gaz à effet de serre qui va contribuer inéluctablement au réchauffement de la planète. Et là on se rend vite compte qu'il existe plusieurs sortes de « climatologues » et de nombreux points de vue disparates sur la question. Nous vivons dans le paradigme bien décrit par José Ortega Y Gasset, celui de la barbarie du spécialisme.

En entrant dans l'observation fine des précipitations au ras du globe, l'intérêt se porte maintenant sur les événements extrêmes produisant des crues violentes et dévastatrices. On touche du doigt les problèmes de densité des points d'observations et ceux de l'aptitude des capteurs à bien mesurer la très grande variabilité des précipitations en un point et la nécessité de trouver d'autres moyens d'estimer correctement les précipitations au ras de tout le globe, y compris sur les océans.

Le point de vue de l'hydrologue confiné à son bassin versant est alors évoqué, avec l'étendue de ses préoccupations. Il nous amène ensuite à envisager toutes sortes de bilans, hydriques et hydrologiques, sur des surfaces allant de la case lysimétrique à celle du ras du globe tout entier. Et là on revient à l'examen des différents points de vue, des différents métiers et méthodes pour conclure d'abord qu'au ras du globe tout entier les précipitations sont bien égales à l'évaporation et qu'ensuite les variations constatées d'une année sur l'autre pourraient s'expliquer par la combinaison et la différence de lieux de stockages et déstockages : dans le globe, principalement dans les océans pour la chaleur, et dans l'atmosphère pour l'eau. Les mouvements de l'atmosphère, générés par les rotations de la Terre et par les processus thermodynamiques issus du rayonnement solaire, expliquent la nécessité d'utiliser des processus stochastiques pour appréhender les phénomènes hydrologiques.

Passage de témoin

Les populations du globe sont soumises en permanence à deux sortes de risques : le manque d'eau et l'excès d'eau. Les risques de manque d'eau peuvent être assimilés à la probabilité d'une année sèche ou à plusieurs années sèches successives. La première partie sur la variabilité des totaux pluviométriques annuels traite partiellement de cette question. Les surfaces concernées semblent assez vastes. L'absence de précipitations, ou leurs relatives faiblesses sont la cause des sécheresses. Il faut renforcer notre capacité à tirer des informations de mesures pluviométriques, ponctuelles dans l'espace, mais effectuées durablement sur des dizaines d'années, avec leurs défauts et lacunes métrologiques : rien ne pourra remplacer cette source pour nous renseigner sur les 2 siècles précédents en matière de climatologie des précipitations. Les risques

liés aux excès de courte durée avec les crues et les inondations, mais aussi certaines calamités agricoles sont d'une autre nature. La surface concernée qui peut être très petite à très vaste, joue un rôle important. De fait, les totaux pluviométriques annuels ne sont plus adaptés à l'étude des crues qui requiert la connaissance de la précipitation recueillie au sol de façon très fine à la fois dans l'espace et dans le temps : ce qu'on pourrait formuler de façon simpliste comme un ensemble de stations d'une très forte densité au sol et dotées d'une capacité à bien décrire la précipitation dans des pas de temps inférieurs à la minute, sans oublier la nature même de la précipitation : de la grêle sur quelques hectares détruit la récolte d'une culture, celle d'un vignoble par exemple.

Mais ce besoin de connaissance fine est émiétté et éparpillé dans différentes directions liées aux finalités très diverses de la recherche ou de l'utilisation opérationnelle : il en découle un manque de connaissance de l'ensemble des besoins des utilisateurs entre eux et l'absence d'une synergie pour arriver à une solution satisfaisante de mesurage. A un moment de ma vie, au début des années 1980, j'avais œuvré en faveur de la création d'un réseau de mesure à fins multiples, pour provoquer une synergie, faire des économies et activer la recherche transdisciplinaire. C'était dans le domaine très particulier de l'hydrométrie des cours d'eau : j'y avais été encouragé par Claude Lefrou, mon directeur d'alors. Aujourd'hui, je pense qu'il était à la fois utopique et dangereux de vouloir tout mettre dans un même moule, parce que personne n'aime cette façon de procéder. Il y a tellement de façons de s'intéresser au même phénomène. Les points de vue sont tellement nombreux et ne convergent pas forcément : il faut accepter toutes les tentatives diversifiant et améliorant notre perception de ce phénomène. Les populations du globe sont régulièrement inquiétées par ce qu'il se dit sur les fluctuations climatiques ou tout simplement sur le changement en cours. Cela ne les empêche pas de vivre et de réagir à chaque écart climatique pour se protéger et s'en sortir.

Arrêtons-nous quelques instants sur les divers procédés employés par d'autres branches de la science pour reconstituer des séries climatiques à partir soit de l'examen de troncs d'arbres (la dendrochronologie), soit de dépôts sédimentaires lacustres, soit de forages dans les glaces polaires, soit de datation au carbone 14 d'eau de source, etc. Il est déjà très difficile d'établir une chronique pluviométrique fiable à partir d'un pluviomètre : alors que penser des reconstitutions à partir

d'indices très indirectement reliés au phénomène recherché, en l'occurrence le climat sous son expression thermométrique et/ou pluviométrique ? Cela peut donner une vague idée du climat de certaines ères ou époques antérieures, comme un climat tropical humide plutôt que froid et sec, mais en aucun cas cela ne peut donner lieu à l'établissement d'une chronique pluviométrique ou thermométrique. Qu'est-ce qui est le moins risqué, faire de la dendrochronologie, avec la prétention d'établir une série d'observations climatologiques, ou faire de la science-fiction à l'aide d'un raisonnement finalisant à partir de la constatation de l'augmentation du CO₂ ? Le raisonnement finalisant consiste à déduire une conclusion à partir de prémisses très partielles. Ici on peut résumer de la façon suivante : les activités humaines sont consommatrices d'énergie fossiles carbonées ; les émissions de CO₂ augmentent et s'accumulent dans l'atmosphère ; or le CO₂ est un gaz à effet de serre qui provoque une élévation de la température à la surface de la terre, donc l'augmentation des émissions de CO₂ entraîne un réchauffement du climat. Tout ce raisonnement est effectué sans aucune considération du fait que l'atmosphère et son interaction avec le globe, notamment les masses océaniques, sont choses très complexes mettant en jeu énormément d'autres variables. Le résultat d'un phénomène complexe ne peut se déduire d'un simple raisonnement partiel de cause à effet. Prendre en compte la vapeur d'eau, gaz à effet de serre bien plus efficace que le CO₂, pose déjà des problèmes très ardues et peut-être inextricables si l'on se contente d'analyser les changements hydriques liés à l'activité humaine du dernier siècle.

Le GIEC est devenu une institution internationale. Il est difficile de détruire une institution : rêvez donc d'abolir la noble institution représentée par le ministère des finances et vous vous heurterez à ce qui est exprimé avec force par l'adage populaire à propos d'une durée de vie quelconque affectant le monde intelligent, par exemple une guerre, une entreprise ou autre chose : le « ça ne durera pas autant que les impôts » clôt la discussion en donnant le sentiment d'une vaine comparaison de la chose vécue avec un phénomène devenu éternel. Il est difficile de détruire une institution internationale, sauf à la modifier comme ce fut le cas de la Société des Nations muée en ONU au lendemain de la seconde guerre mondiale. Donc l'espoir demeure concernant le GIEC. Sans songer à en modifier le sigle, on peut se contenter d'en transformer le contenu : c'est mon espoir, très ténu il est vrai.

Conclusion générale sur la traversée de la pluie

*Je vous laisse à mon tour comme le danseur qui se lève une dernière fois
Ne lui reprochez pas dans ses yeux s'il trahit déjà ce qu'il porte en lui
d'ombre*

*Je ne peux plus vous faire d'autres cadeaux que ceux de cette lumière
sombre*

*Hommes de demain soufflez sur les charbons. A vous de dire ce que je
vois*

Aragon

Ce sont les derniers vers d' « Epilogue » du recueil *Les poètes*, 1960

Troisième partie

AUTRES TEXTES

Chapitre 25

Présentation de ces autres textes

Voici trois textes qui à première vue ont peu de choses en commun avec la traversée de la pluie.

Le premier texte a été écrit courant 2009-2010. C'était suite à une idée d'éditer un livre collectif en hommage à Gabriel Rougerie. Le lecteur trouvera qu'il est en total décalage par rapport à la « traversée de la pluie ». Pourtant l'élément déclencheur de la réflexion est un violent orage sur Paris début juin 1971. Ensuite plus une goutte de pluie durant de nombreux jours, ce qui est statistiquement conforme aux 94 ou 95% du temps qui passe à Paris. Cela commence par un exemple de déterminisme hydraulique, puis

Le second texte « Bouajila » a été rédigé au début de ce qu'on a appelé la révolution arabe en Tunisie, laquelle a fait remonter une foule de souvenirs de mes années passées là-bas. La crue dévastatrice de l'oued Miliane qui draine le versant nord de la Dorsale tunisienne avant de se jeter en Méditerranée au sud de Tunis, est restée dans ma mémoire d'observateur impuissant. Elle m'a rappelé les vicissitudes de l'observation sur le terrain et l'importance des relations humaines.

Le troisième texte, « le changement climatique encore et toujours », a été écrit à l'été 2011. L'élément déclencheur a été Jacques Bonvalot, un de mes camarades du 3^{ème} cycle à Besançon, avec lequel j'avais renoué lors de la fête donnée en l'honneur des 90 ans de Gabriel Rougerie. L'IRD venait de lui demander de piloter l'atlas de Nouvelle Calédonie qui est en cours de publication. Jacques m'a fait connaître par courriel Joël Danloux, l'auteur de la question posée sur les températures de l'air en Polynésie qui m'a servi de prétexte à écrire sur le sujet. Je

n'ai jamais rencontré Joël Danloux et je le remercie vivement de son aide involontaire.

A l'époque mes amis Armand, Pierre et Yves m'ont vivement encouragé à publier ce texte. Comme je m'étais enfin décidé à préciser ma pensée sur un des éléments fondamentaux du climat, la pluviométrie, et que je craignais être dérangé par de possibles remous polémiques suite à une éventuelle publication, j'ai préféré attendre et le rebaptiser en « épilogue pour nos gouvernants ». C'est en quelque sorte une incitation à mettre de l'ordre dans le GIEC et à réorienter ses travaux.

Chapitre 26

La propagation d'un débit ajouté à l'étiage en cours

L'agence financière de bassin Seine-Normandie était membre du comité technique des barrages réservoirs de l'institution interdépartementale du bassin de la Seine (IIBRBS). A partir de 1971, j'accompagnais toujours le directeur ou son adjoint, parce que j'étais en charge des études hydrologiques des différents sites de barrages en projet en amont de Paris, en même temps que ceux situés sur le bassin de l'Oise (Origny Sainte Benoîte, Varennes et Villers en Argonne). L'agence finançait le barrage « Marne » en construction (aujourd'hui le lac du Der) au titre du soutien des étiages. Un des sujets récurrents des ordres du jour du comité était le programme des lâchers de soutien d'étiage prévus du 1^{er} juillet au 31 octobre par le règlement d'eau des 2 principaux barrages existants, celui du lac de la Forêt d'Orient sur la Seine en amont de Troyes et celui de Pannecière sur l'Yonne en amont de Clamecy.

Un jour de juin 1971, en pleine réunion du comité, son responsable est appelé de l'Elysée. Le président Pompidou et ses hôtes du jour avaient été horrifiés de voir des poissons le ventre en l'air à la surface de la Seine dans Paris intra-muros, victimes de l'orage de la veille et du bon fonctionnement des déversoirs d'orage qu'Eugène Belgrand avait mis en place sous le Second Empire. Le largage en Seine des matières déposées dans le réseau d'assainissement et avides d'oxygène dissous avait privé la faune halieutique de son nécessaire de survie. La question posée par l'Elysée était de noyer et de faire disparaître ce spectacle dégoûtant au moyen de l'eau stockée dans les barrages réservoirs que l'Etat avait financés. Toutes les personnes présentes à la réunion se regardèrent : combien de temps une lâchure (ce substantif désigne

le résultat du lâcher) de 20 m³/s met-elle depuis le barrage-réservoir « Seine » (ou lac de la Forêt d'Orient) jusqu'à Paris ? Ce problème trouva sur le champ, à titre provisoire, une solution par analogie au temps de propagation des crues que l'étude de la crue de 1910 avait fixé à 8 jours entre Troyes et Paris. Certains membres⁹⁴ du comité, polytechniciens pour la plupart, avaient préconisé qu'en étiage sévère on pouvait aller jusqu'à 2 semaines pour une lâchure de 20 m³/s. La décision fut prise de commencer immédiatement les lâchers, chacun évitant d'en commenter le bien fondé. En mai 1976, le même problème fut soulevé en raison du très bas débit de la Seine à Paris et ce malgré la mise en service du barrage « Marne⁹⁵ ». Le comité technique décida de tabler sur un délai de 3 semaines, tout en étant très réservé sur l'importance du débit à lâcher, parce que l'étiage pouvait être très long et présenter des difficultés en fin d'automne. C'était déjà arrivé en novembre 1971.

Cette question du temps de propagation me tarabusta jusqu'au jour où j'eus l'idée de la traiter comme un vulgaire problème de baignoire et de robinet. Les lâchures en période d'étiage n'affectent que le lit mineur, contrairement à la période de grandes crues qui mobilise les volumes de stockage incomparables du lit majeur, notamment dans la zone de la Bassée. Or le lit mineur à l'aval de Troyes ne fait que 20 m de large. En me fondant sur mon expérience en hydrométrie, j'estimai la hausse du niveau de l'eau consécutive à un apport de 20 m³/s, à environ 1 m. Soit une section amont de la « baignoire » accrue de 20 m². La Seine dans Paris fait 100 m de large. Un apport de 20 m³/s ne devrait pas entraîner plus de 0,1 m d'élévation du niveau d'eau. Soit une section aval de la « baignoire » accrue de 10 m². Si on fait l'hypothèse que le cours mineur de la Seine est de 300 kilomètres entre Troyes et Paris⁹⁶, le volume de la baignoire à compléter est de 300 000 m x 15 m² (la demi somme des sections amont et aval) = 4 500 000 m³. Pour une lâchure de 20 m³/s le temps de remplissage du complément de la « baignoire » est de 225000 secondes, soit 2,6 jours ! Bien sûr il faut ajouter quelques heures pour que le régime permanent s'installe à Paris. On peut ergoter sur le bien fondé des ordres de grandeur choisis pour l'estimation :

94. Que des hommes : nous étions en 1972 !

95. Faiblement rempli cette année là parce qu'on avait observé un phénomène d'élasticité de la digue en terre : le principe de précaution avait été activé bien avant son entrée dans la Constitution.

96. Je travaille de mémoire, n'ayant gardé aucune archive. Cette distance est supérieure à 200 kilomètres et inférieure à 400 d'où mon choix : pour ceux que cela intéresse, la codification hydrologique donne une distance très précise.

par exemple la présence de multiples bras dans Troyes et sur plusieurs dizaines de kilomètres à l'aval, ou la possibilité de faire transiter un surcroît de débit de 20 m³/s dans les biefs canalisés sans élever le niveau : quoiqu'on fasse, le temps de remplissage tourne autour de 3 jours et non pas de 2 à 3 semaines. Mais une chose est sûre : ce n'est pas le genre de raisonnement à utiliser pour convaincre. Après une campagne de mesures pour suivre les premières lâchures de 1978, puis la mise en œuvre en 1979 d'un modèle hydraulique fondé sur les équations de Barré de Saint Venant et appliqué sur une foule de données recueillies sur le terrain (entre autres les profils en long et les profils en travers) nous arrivâmes à la même conclusion, convaincante celle-là !

Continuation sur la vitesse d'écoulement.

Revenons un instant sur l'emploi du raisonnement par analogie à la propagation des débits de crue : ce raisonnement fondé sur des ordres de grandeurs manipulés sur un coin de table n'est pas à proscrire. Bien au contraire il faut l'employer en évaluant ce qui change dans les deux cas : ici ce sont manifestement les volumes stockés dans les champs inondables qui font la grande différence par rapport au surcroît de volume en lit mineur à l'étiage.

Mais il y a une autre variable à considérer, celle des débits. Pour fixer les idées : 2500 m³/s dans Paris au maximum de la crue de 1910 contre 25 m³/s mesurés au début juillet 1976. Celui qui raisonne sur le débit pense implicitement à la notion de vitesse d'écoulement, d'autant que la grande majorité des techniques de mesurage (action de mesurer par opposition à mesure qui traduit le résultat de l'action) passent par l'évaluation des vitesses d'écoulement au moyen d'outils tels que⁹⁷ :

- le temps de déplacement de bâtons lestés sur une distance connue ;
- le moulinet mécanique de Woltman utilisé par l'équipe de Belgrand le 3 septembre 1870 sur la Seine à Port à l'Anglais en amont du

97. Cette énumération montre un aspect la diversité des techniques de mesurage pour s'adapter à chaque situation de terrain, sans oublier que ces techniques se modernisent, changent et évoluent dans le temps.

confluent avec la Marne (23 m³/s). Ce résultat additionné aux 12 m³/s de la Marne symbolisa longtemps le débit référence de l'étiage minimal à Paris de 35 m³/s⁹⁸, sans barrage réservoir sur l'amont du bassin.

- le moulinet électromécanique qui lui a succédé ;
- les sondes à ultrasons ;
- même les jaugeages chimiques font appel à la connaissance des vitesses pour bien repérer l'endroit des prélèvements de bon mélange de la solution diluée.⁹⁹

Tout cela imprègne fortement l'esprit et contribue à la confusion entre temps de propagation d'un débit ajouté à un débit existant et vitesse moyenne d'écoulement entre section amont et section aval. Il y a fort à parier qu'un ensemble de particules identifié à Troyes mette en moyenne plus de 3 semaines pour parvenir à Paris dans les conditions de l'étiage de 1976. Pour en donner un élément de preuve, je reviens sur le jaugeage effectué sur la Seine à Paris au tout début juillet 1976 et auquel j'ai participé. Le jaugeage a eu lieu en fin de nuit : il faut attendre environ 2 heures après l'arrêt de la navigation et utiliser au mieux ce qu'il reste de temps avant sa reprise. Le service spécialisé de la circonscription électrique Nord et Paris a procédé au choix des verticales de mesure. Puis sur chaque verticale il a exploré le champ des vitesses : c'est la méthode classique. En surface de l'eau il y avait des feuilles mortes dont beaucoup avaient tendance à remonter, peut-être à cause d'une brise très faible, sans omettre la possibilité de contre-courants. Il y avait un pourcentage important de la section mouillée où la vitesse était nulle. L'inertie des moulinets même les plus sensibles de l'époque n'est pas à négliger : jusqu'à 2 à 3 cm/s ils ne fonctionnent pas du tout.

98. Il est difficile aujourd'hui d'établir un classement pertinent des étiages sévères, tant les conditions ont changé et changent encore au cours du temps. Par exemple en début juillet 1976 à Paris, outre le faible débit de lâchures des barrages qu'il faudrait retirer, il conviendrait d'ajouter une bonne partie des 22 m³/s prélevés par les usines d'alimentation en eau potable de l'agglomération parisienne et rejetés en réseau d'assainissement vers l'aval à Achères. Tout cela sans compter les modifications de l'occupation des sols : urbanisation, mise en culture de zones bocagères, drainage agricole et irrigation en plein développement. Ce qui fait dire de manière générale que les séries de données hydrologiques ne sont plus stationnaires parce qu'elles sont soumises en permanence à de nouvelles influences.

99. Les jaugeages volumétriques comme ceux effectués en deuxième moitié du 19^{ème} siècle à l'étiage sur le bief aval de l'Orne à Caen -en rehaussant le barrage aval, en colmatant les portes à flots et en mesurant l'élévation du niveau du bief toutes les heures pendant 2 à 3 jours- forment une exception parce qu'ils échappent au passage obligé par la connaissance de la vitesse d'écoulement.

S'il y a des contre-courants supérieurs à 4 cm/s, ils enregistrent une vitesse mais on ne sait pas qu'il s'agit de contre-courants¹⁰⁰. Bref le responsable du service procéda à l'interprétation des données et trancha en faveur d'un débit de 25 m³/s¹⁰¹ parce qu'il faut donner un résultat et un seul. Comme la section mouillée en étiage à Paris est d'environ 500 m² (100 m de large avec un tirant d'eau de 5 m maintenu permanent par le barrage aval de la navigation) on obtient une vitesse moyenne d'écoulement de 5 cm/s dans la Seine canalisée en ce début juillet 1976. Soit 14 jours pour parcourir les 60 kilomètres de la Seine canalisée à l'amont de Paris.

Les expériences de coloration, avec de la fluorescéine ou de la rhodamine, m'ont toujours laissé plein d'interrogations. Je vais essayer de me faire comprendre. D'une part en jaugeage chimique dans les torrents, la fluorescéine était utilisée pour déterminer la distance de bon mélange afin d'opérer les prélèvements d'échantillons à la bonne distance aval de l'injection en continu d'une solution de bichromate de sodium et obtenir la donnée recherchée, en l'occurrence le débit du cours d'eau à l'aide du rapport des concentrations en bichromate et du débit d'injection. D'autre part pour prévenir les pollutions accidentelles, la rhodamine était employée pour évaluer le temps d'arrivée d'un rejet de produits polluants au droit d'une prise d'eau potable. Dans le premier cas, la durée entre l'arrivée des premières particules de fluorescéine et l'installation d'un régime permanent m'avait toujours paru un mystère alors que nous avions affaire à des cours d'eau torrentiels : je

100. En 1971-1972, nous avons été confronté à un problème de ce type sur l'Orne à l'entrée du canal de Caen à la mer en période d'étiage assez sévère : lorsqu'on plongeait progressivement le moulinet, on constatait que le compte tours s'incrémentait puis s'arrêtait à mi profondeur puis reprenait de plus belle jusqu'au fond. Les mesures de résistivité de l'eau et la consultation de l'annuaire de marées nous donnèrent des éléments d'explication : il existait un biseau salé entre la zone d'eau morte et le fond du lit qui remontait le cours de l'Orne avec la marée. Le moulinet ne pouvait pas faire la différence de sens d'écoulement. A cette occasion, on découvrit que le biseau salé pouvait remonter jusqu'à Fleury/Orne à l'endroit même du projet de prise d'alimentation en eau potable de Caen.

101. Sur le moment il m'a semblé que le résultat final se situait plutôt dans une fourchette de 15 à 25 m³/s. Ce jaugeage m'a incité par la suite à faire entreprendre une série d'études sur la précision des données hydrométriques recueillies sur les stations de jaugeage à l'aval des barrages réservoirs dans le cadre d'un programme d'amélioration de leur gestion. Il se révéla que les débits d'étiage sévère étaient connus à 120% près dans la plupart des cas, bien que les problèmes fussent de nature très différente d'une station à l'autre, avec la présence de végétation aquatique à cycle saisonnier sur les stations amont et les difficultés spécifiques aux fleuves canalisés. Sur les biefs canalisés, il était judicieux d'installer des stations à ultrasons du même type que celles qui fonctionnaient déjà en Allemagne sur le Rhin et la Moselle.

n'ai jamais eu de formation hydraulicienne et je faisais confiance à ceux qui savaient. Dans le deuxième cas, je résolus de comparer le largage d'un paquet de rhodamine en un point du fleuve, la Seine par exemple, à la masse groupée de milliers de coureurs au départ d'un marathon : le groupe de marathoniens, après quelques minutes commence à s'allonger et n'en finit pas de s'allonger jusqu'à la ligne d'arrivée. Pour moi il en est ainsi des particules de colorant qui jouent des coudes au départ, forment un nuage de plus en plus allongé, et n'en finissent pas de passer la ligne d'arrivée, c'est-à-dire l'endroit de la prise d'eau, d'où la question que je me pose de façon récurrente : quelle est la signification réelle de la notion de vitesse moyenne d'écoulement, hors du contexte d'une recherche finalisée¹⁰² ? L'autre question était : « comment réagissent les particules d'eau à cette intrusion de colorant ? ». Jouent-elles aussi des coudes pour parvenir à leur rang d'arrivée, comme les individus que nous sommes en train de courir un marathon ? Dans le cas d'une pollution accidentelle survenue aux sources de la Seine, sur un très court laps de temps par exemple inférieur à 5 minutes, d'un volume et d'une composition connus, combien de temps met la première particule polluante à arriver sous le pont de Normandie ? Et la dernière ? Le temps moyen peut-il être représenté par la demi-somme des 2 ? Où se situe le temps médian, c'est-à-dire le temps mis par les 50 premiers pourcents de particules polluantes ? Quelle est l'influence de la température de l'eau ? Que se passe-t-il avec différents produits polluants ? Sont-ce les mêmes temps ? Je laisse volontairement de côté une foule de processus et de phénomènes qui interviennent chemin faisant, comme l'adsorption, le dépôt sur les berges ou le lit, l'ingestion par les microorganismes, ..., . Sans parler du devenir de ces produits dans le milieu marin et plus loin encore, il est parfaitement possible de se poser quantité d'autres questions en se plaçant dans le cadre d'un autre paradigme : par exemple celui de la mémoire de l'eau.

Je sens le lecteur devenir fortement réticent à la vue de ces divagations. Et pourtant, ..., .

102. En 1976, à la demande de l'agence, nous avons procédé à l'inventaire des vitesses d'écoulement sur une cinquantaine de tronçons de rivières du bassin Seine-Normandie, alors que nous étions en plein étiage exceptionnel. La finalité était de mesurer le pouvoir auto épurateur des rivières concernées en appliquant les équations de Stretter & Phelps sur l'oxygénation par la vitesse d'écoulement et la configuration du lit.

Chapitre 27

Bouajila

Recruter des observateurs est chose délicate. A mon arrivée en Tunisie, le réseau de parcelles et de bassins expérimentaux était en place. Je ne fis que participer à la mise en place du Parshall à l'exutoire du bassin versant cultivé en banquettes et courbes de niveau. Un Parshall est un débit-mètre (je n'aime pas ce néologisme mal gaulé, mais il dit bien sa finalité) fondé sur un double rétrécissement de la section d'écoulement, latéral et vertical (application des découvertes de Venturi). Sur la base des indications techniques données par les expérimentateurs américains, on construit l'ouvrage avec une prise d'eau pour le limnigraphe, lequel enregistre les hauteurs d'eau en fonction du temps. C'est l'idéal pour mesurer les débits d'un oued qui passe de 0 l/s à une pointe de crue de plusieurs m³/s en quelques dizaines de minutes et qui retombe à quelques l/s en 2 fois le temps de montée des eaux. Dans ces cas extrêmes il est impossible d'effectuer des jaugeages classiques. Cela suppose une grande confiance dans la technique. Or j'ai le souvenir d'avoir fait installer en 1966 un « H flume », débit-mètre un peu plus complexe que le Parshall précité sur un ruisseau à Lanobre (Cantal) à proximité de Bortles-Orgues (Corrèze), à coté des baraquements d'EDF occupés alors par « Etudes et recherches ». Là il s'agissait d'un écoulement pérenne susceptible d'être jaugé de façon classique en chimique. Nous constatâmes un écart systématique d'environ 17% et vérifiâmes au moins 2 fois les cotes de l'installation qui paraissaient correctes par rapport à celles indiquées dans les fiches techniques. Comment savoir où résidait la source de l'erreur ?

Mustapha était l'observateur principal qui faisait quotidiennement la tournée des appareils, 4 limnigraphes et 1 pluviographe, sans compter

les travaux résultants chaque fois qu'il y avait une précipitation comme l'estimation des volumes récupérés dans les cuves de chaque parcelle expérimentale. Avec mon arrivée, nous complétâmes l'ensemble par des prises d'échantillons d'eau pour déterminer les débits solides. Mustapha, qui savait lire compter et écrire, assurait l'essentiel de cette mission, sauf pour le bassin forestier couvert de pins d'Alep situé trop à l'écart de son trajet quotidien. On lui demanda s'il connaissait quelqu'un qui serait susceptible de faire des prélèvements en temps de crues : il nous indiqua Bouajila, qui habitait à quelques centaines de mètres de là. Mais Bouajila, la quarantaine passée et toujours pieds nus, ne savait ni lire ni écrire : il avait du apprendre mais ne savait plus. Bouajila était très pauvre : il m'avait invité à pénétrer dans son gourbi très petit avec un bas flanc et une natte. C'était un ouvrier agricole qui travaillait à la demande à la ferme coopérative du Djouggar. Il tenait beaucoup à être observateur pour avoir quelques sous de plus. Avec Mustapha, nous aboutîmes à une sorte de protocole que devait suivre Bouajila : chaque fois qu'il y avait une précipitation, il devait se rendre au déversoir¹⁰³ mesurant le débit de l'oued à l'exutoire du bassin forestier de 60 hectares. La plupart du temps en cas de pluie faible, l'oued ne réagissait pas ou peu : ce n'est qu'à l'occasion de pluies intenses, même sur de courtes durées comme une demi-heure, que l'oued se mettait à couler sans jamais atteindre un débit comparable à celui du bassin agricole cultivé dans le sens de la pente ni même à celui du bassin versant cultivé en banquettes et en courbes de niveau.

Sur le plan pratique, Bouajila devait prendre des échantillons à intervalles réguliers : pour cela nous l'avions doté d'une montre. Sur chaque étiquette de la bouteille d'échantillon, il dessinait la hauteur lue à l'échelle limnimétrique et les aiguilles de la montre : nous avons fait des essais et le système pouvait fonctionner de cette manière-là. Les échantillons des quelques crues d'avril à septembre 1964 me posaient une énigme. On constatait des concentrations en matériaux solides bien trop importantes par rapport à ce que je pouvais attendre. Lors de l'énorme crue du vendredi 30 octobre 1964 qui, pour le Miliane se prolongea après minuit sur l'aval du bassin du Miliane, j'étais présent sur le terrain : la météo avait prévu des précipitations plus ou moins fortes. Hassan, le chauffeur, m'avait conduit directement ce matin-là

103. C'était un déversoir triangulaire en lame mince métallique, surmonté d'une section rectangulaire (une idée de Cormary), et forgé à l'atelier du CERGR.

à l'exutoire du bassin forestier. Bouajila n'y était pas. Je commençai à prendre des échantillons pendant le début de la crue et j'embarquai les bouteilles dans la Land Rover pour aller voir ce qu'il se passait sur les deux autres bassins et sur les parcelles expérimentales. Dès 14 heures je pressentais une crue catastrophique pour les gens de l'aval. Mais il n'existait pas de moyens de prévenir faute de téléphone¹⁰⁴. Les déplacements sur le terrain malgré le véhicule adapté se révélaient de plus en plus risqués. J'avais lu dans la bibliographie américaine que lorsqu'une banquette de rétention cédait sous l'effet de l'eau, il s'ensuivait une crue hors norme, emportant tout sur son passage. Nous rentrâmes, Hassan et moi, vers 22-23 heures nous abriter dans l'ancien pénitencier du Djouggar. Les éclairs étaient si nombreux que nous y voyions comme en plein jour. Avec le tonnerre et les trombes d'eau, c'était très impressionnant.

Le retour sur Tunis nous prit environ 10 heures le lendemain au lieu d'une heure habituellement : les ponts, notamment celui du Fahs avaient été emportés et les routes aussi. On retrouva le tablier de ce pont plus de 500 m à l'aval. Curieusement, le tube contenant les câbles et le flotteur du limnigraphe avait été emporté avec le tablier, mais l'enregistreur était encore fixé sur ce qu'il restait du parapet du pont. Il indiquait que le pont avait cédé vers minuit et la hauteur enregistrée a permis aux hydrauliciens d'estimer la crue à 1000 m³/s. Le matin, en passant avant le début de la pluie, j'avais observé un écoulement de quelques litres par seconde à travers les roseaux : cela justifiait le nom du cours d'eau puisque Miliane signifie pérenne.

Le lundi matin, j'étais de retour avec Hassan. Quelle ne fut pas ma surprise de voir un casier de bouteilles contenant des échantillons prélevés avec des étiquettes dessinant les heures pendant lesquelles j'étais présent sur le site, accompagnées des hauteurs d'eau. Il me fallait d'urgence demander des explications à Mustapha et à Bouajila. Et là, je compris tout. Les échantillons des crues précédentes étaient fabriqués après coup. Comme les deux compères avaient remarqué que j'étais très attentif à la boue contenue dans l'eau, Bouajila remplissait les bouteilles avec l'eau piégée dans la pelle du déversoir et complétait abondamment avec la boue du fond. Et Mustapha lui indiquait l'heure et la hauteur d'après l'enregistrement du limnigraphe, que Bouajila dessinait sur

104. J'appris par la suite que les téléphones existants dans le secteur avaient été très vite hors d'usage. Il y eut une trentaine de morts, essentiellement des personnes surprises en pleine nuit par la brutale montée des eaux dans la plaine inondable.

l'étiquette. Quelle désillusion ! Cet épisode m'apprit beaucoup sur l'importance de la relation humaine et la manière d'instaurer la confiance nécessaire et indispensable entre le gestionnaire de réseau d'observation et l'observateur. Pour moi il n'était pas question de sévir. La seule façon de faire était d'assurer la confiance pour les épisodes à venir : je n'avais pas d'autre solution. J'éliminai de ma recherche tous les échantillons prélevés par Bouajila jusqu'au 31 octobre 1964 compris.

Bouajila ne savait pas trop comment s'y prendre pour se faire pardonner. Il me proposa, contre quelques cartouches destinées à alimenter sa vieille pétoire, de tuer un sanglier. Je n'avais pas encore accédé à sa demande que le surlendemain, à mon retour, il m'attendait avec un carcassin d'une douzaine de kilos. Il m'expliqua que pour lui c'était très facile de se mettre à l'affût près du déversoir où les sangliers venaient s'abreuver dans la pelle. Il ne l'avait jamais fait auparavant parce que sa religion lui interdisait de manger de l'hallouf. En revanche, il décimait les compagnies de perdrix de façon très simple. Il le faisait au moyen d'un cadre de lattes de 2 m sur 3 m grillagé et supporté à une extrémité par un morceau de latte d'environ 1,2 m de haut attaché à une ficelle d'une vingtaine de mètres, avec un peu de paille garnie de grain disposée sur le sol à l'aplomb du cadre grillagé. Bouajila se cachait dans une des nombreuses tranchées creusées par l'érosion. Il attendait patiemment la venue des perdrix qui se régalaient du grain avant de se trouver prises sous le grillage : Bouajila avait alors tiré d'un coup sec la ficelle attachée à la latte soutenant le cadre. Un jour, il en avait pris trente deux d'un seul coup. Il faut dire qu'à l'époque, une compagnie de perdrix comptait plus d'une centaine d'individus. Bouajila mettait ses précieuses prises dans des petites cages. Il en avait offert trois au dessinateur qui m'accompagnait ce jour-là parce que je voulais lui montrer le pourquoi des dessins que nous lui demandions de faire. En arrivant à Tunis, les perdrix étaient mortes étouffées, donc non consommables par un musulman. Je ne l'ai jamais raconté à Bouajila, pour ne pas le peiner.

Sur le terrain, je me suis rendu compte combien Mustapha, Bouajila et d'autres s'accommodaient bien du climat en général et de l'ardeur du soleil en été soit pour récolter à la faucille le blé des parcelles de culture en sec destinées à comparer les cultures en courbe de niveau d'avec celles dans le sens de la pente, soit pour faire un ouvrage pour collecter les alluvions que le ruissellement dans un thalweg drainant un minuscule bassin versant aurait pu déplacer. J'avoue que j'étais très vite hors

course et inadapté à ce genre de tâches. Sur le terrain, j'étais toujours bien accueilli, et cette chaleur humaine me semblait nécessaire et bien supérieure à tous les petits désagréments du début. J'ai compris à cette époque-là combien la confiance était indispensable dans la conduite d'un projet, a fortiori d'une recherche : et la confiance ça se gagne sur le terrain, pas dans les livres ni dans l'idéologie ou la pensée a priori, quelle que soit la nature, la qualité ou la compétence de la personne à laquelle nous avons affaire. Je crois avoir retenu la leçon pour le restant de ma vie. Je ne suis pas sûr que les méthodes managériales faisant l'actualité ici et là en soient imprégnées ne fusse qu'un petit peu.

Chapitre 28

Epilogue pour nos gouvernants

Le changement climatique encore et toujours.

*« Vous cherchez qui ? La Vérité ? C'est pas ici » Léo Ferré dans
« les temps modernes »*

Voici la réponse à un hydrologue qui m'a fait l'honneur d'être destinataire de la copie d'un courriel posant les deux questions suivantes accompagnées de 4 pages scannées extraites d'un rapport d'études de 2 stagiaires de Météo-France consacré à l'analyse d'une chronique d'observation de la température de l'air à Tahiti. Le choix des stagiaires eût pu être différent. Mais ce courriel a réveillé en moi des souvenirs que je croyais avoir définitivement enfouis depuis plus de 10 ans et qui n'ont pas grand-chose en commun avec la Polynésie. Alors jugez-en par vous-même.

Cher ami hydrologue,

Sur les questions que tu soulèves, je ne peux avoir que des réponses gênées et gênantes.

**« Que peut-on penser des données tirées
de cette station de référence qui s'est pas
mal déplacée, tant dans l'espace qu'en altitude ? »**

Le rêve de tout hydro-climatologue est d'avoir affaire à une chronique homogène d'observations. Dans la réalité des choses, ce rêve a

d'autant moins de chances de se réaliser que la chronique est longue. Je pourrais étayer abondamment cette assertion dans le domaine pluviométrique, d'après mon expérience vécue, notamment en France métropolitaine. Pour ce qui concerne les températures, j'ai tout de même quelques éléments probants. Tout d'abord, par habitude, nous travaillons sur les données publiées. A mon époque, fin des années soixante, c'était la Météorologie nationale, direction rattachée pour partie au ministère des Transports et pour une autre à la Défense. Cette remarque est faite pour insister sur les différents changements institutionnels effectués dans le domaine des observations météorologiques durant des décennies. En 1853, date du début des observations à Tahiti, il n'y avait pas d'institution ad hoc en Métropole en dehors du réseau de densité lâche des observatoires de Physique du Globe. Ce n'est qu'en 1876 que fut décidée la création du Bureau Central Météorologique qui ne fonctionnera qu'à partir de 1878. Après une lutte sans merci que se livrèrent durant plusieurs années les astrophysiciens emmenés par Le Verrier et les naturalistes dont Renou. Ce sont ces derniers qui l'emportèrent. Pour résumer, la finalité des mesures était certes d'esprit scientifique mais orientée essentiellement sur la connaissance de l'interface air-sol. Cette organisation n'empêcha pas Teisserenc de Bort d'effectuer les premiers sondages atmosphériques dans la dernière partie du 19^{ème} siècle. Puis vint la Grande Guerre et les débuts de l'aviation de combat.

A l'issue de la guerre et avec les premiers développements de l'aviation civile, le gouvernement français décida que la météorologie devait se mettre au service de l'aviation et de la marine : pour ce faire, il nomma à sa tête le colonel Delcambre. Les données d'observations climatologiques subirent les conséquences de ce changement de finalité, avec des résultats quasi caricaturaux dans le domaine de la pluviométrie. A la Libération, certains avaient vu le danger et il y eut l'ordonnance de 1946 pour organiser les observations climatologiques. Mais le fonctionnement de l'institution « Météorologie nationale » fit que les personnels étaient bien plus intéressés par les métiers de la prévision que par l'observation climatologique, au point que Raymond Arléry qui dirigeait la division « climatologie » et avec lequel je rédigeais un fascicule de la monographie du bassin Seine-Normandie, me déclara que la climatologie était l'hospice de la météorologie !

Tout cela pour montrer l'influence des changements de finalité liés aux changements institutionnels sur l'établissement des chroniques

d'observation. Dans la réalité de terrain, les relevés de température de l'air étaient effectués dans des lieux publics gérés par l'Etat, comme les écoles normales aujourd'hui disparues. Entre les deux guerres on assista à une migration de ces lieux de relevés vers les aérodromes, donc du centre d'une agglomération vers l'extérieur. Puis à partir de la Libération les stations météo pérégrinèrent d'un premier endroit de l'aérodrome vers un autre au gré des aménagements successifs. C'est ainsi. Je ne connais pas l'évolution dans les autres Etats du monde, mais je suppose qu'ils ont tous fait subir des changements d'emplacement à la plupart de leurs stations météo. Par conséquent, il faut nous en accommoder. Bien entendu, ces changements s'opèrent sur les coordonnées géographiques, mais aussi en altitude comme tu le soulignes pour Tahiti. Jean Tixeront, qui était le maître d'œuvre de la monographie de bassin Seine-Normandie m'avait demandé de réaliser les cartes des températures moyennes mensuelles et annuelles (les normales 1931-1960) en les réduisant à l'altitude moyenne du bassin, c'est-à-dire à 150m d'altitude. L'objectif était double : éviter d'amplifier un biais par une réduction au niveau de la mer comme c'était la coutume en répartissant ses effets de part et d'autre des 150 mètres, tout en gardant la possibilité de reconstituer les moyennes mensuelles et annuelles en n'importe quel point du bassin sur la seule connaissance de son altitude. Je ne sais pas si cette possibilité a été utilisée par d'éventuels utilisateurs, mais cela leur était offert. Cette réduction au niveau de la mer ou à 150m d'altitude suppose résolue la question du choix de la valeur du gradient de température. Pour Seine-Normandie, je me souviens que cette valeur était inférieure à 0,5°C par 100m de dénivelée, légèrement variable d'un mois à l'autre, et que j'ai laissé mûrir mon choix durant plusieurs jours. Finalement j'ai opté pour une valeur unique parce qu'une recherche plus approfondie m'apparaissait déplacée compte tenu de l'enjeu, à savoir réaliser les cartes d'un atlas. Aujourd'hui j'ai oublié la valeur finalement retenue, vraisemblablement une diminution légèrement inférieure à 0,5°C pour une augmentation de 100m en altitude et inversement. Cependant je me remémore une remarque de Jean Tixeront à propos de la carte des normales annuelles : il constatait une anomalie positive sur le Haut Morvan et une négative aux alentours de Romilly-sur-Seine. Aujourd'hui je mets en relation cette remarque avec une réminiscence de la lecture du superbe ouvrage d'Alfred Angot sur « *la marche des pluies en France* », publié à la charnière des 19^{ème} et 20^{ème} siècles. Dans sa description du déroulement annuel des précipitations sur le Morvan, Alfred Angot

observe qu'au-dessus de 600m d'altitude, le régime annuel des pluies est semblable à celui des côtes de la Manche au niveau de Cherbourg, à savoir un maximum en automne et un minimum au printemps, contrairement à ce qui est observé sur le reste du bassin de la Seine. Autrement dit, l'anomalie positive décelée par Tixeront proviendrait d'un îlot de régime océanique lié à son altitude, au milieu d'une zone à régime légèrement plus continental. Cette remarque m'est revenue à l'esprit parce que je l'avais déjà préconisée pour la reconstitution de débits sur les fleuves côtiers du département de la Manche où il n'y avait pas de stations de jaugeage en utilisant les débits observés depuis les années trente aux barrages du Chaumeçon sur le Chalaux et du Crescent sur la Cure, dont les bassins versants sont situés au dessus de 600m, et en se fondant aussi sur les précipitations observées en Manche et sur le Morvan.

Pour revenir à notre propos, l'écart en altitude de 93m a forcément une incidence sur la chronique. Je n'ai jamais travaillé sur les données des îles intertropicales, mais je subodore que le relief et l'orientation des versants au vent ou sous le vent ont une incidence sur les valeurs de température : les changements d'emplacement de la station devraient être analysés aussi en fonction des changements d'orientation au vent. Maintenant venons-en aux questions de matériels et d'environnement immédiat de la station. D'abord une remarque générale : les thermomètres ont beaucoup évolué au cours des deux derniers siècles. A une émission récente de C dans l'air sur « le changement climatique » animée par Yves Calvi – c'est un de mes plaisirs de retraite –, le représentant du GIEC, prix Nobel de la Paix, a indiqué que de nos jours on pouvait mesurer la température au centième de degré. Je n'ai toujours pas compris où il voulait en venir. Avec ma mauvaise foi habituelle, j'ai interprété cette intervention comme signifiant : je suis la personne compétente et vous autres vous n'y connaissez rien. Ça me rappelle la deuxième partie du roman de Stendhal « Lucien Leuwen », qui se passe dans les arcanes du pouvoir où la fatuité et l'arrogance des personnages figurent parmi les thèmes centraux. Ça me rappelle aussi ce qu'avait déclaré mon directeur d'alors au colloque de Montbard en 1996 qu'il m'avait demandé d'organiser autour du thème « *mesurer l'eau* » : « *une mesure mal faite toujours de la même façon est bien meilleure qu'une innovation un peu hystérique* ».

Sur l'environnement de la station, les meilleurs peuvent commettre des erreurs préjudiciables pour leurs successeurs, par exemple Renou

qui fit planter de jeunes arbres en 1872 autour de la toute nouvelle station de Paris-Montsouris comme me l'indiqua Jacques Dettwiller, photos à l'appui. Le même Dettwiller m'avait expliqué avoir travaillé sur les séries de température des observatoires français, les seuls à n'avoir pas subi de déplacement. Il n'avait noté aucune tendance à celui de Nantes jusqu'en 1960, date à laquelle l'emprise de l'agglomération qui s'élargissait sans cesse se fit sentir. De même à Besançon, où il m'avait entraîné au congrès de l'AFAS en 1969 et où l'observatoire se trouvait désormais englobé dans l'extension de l'agglomération commencée dès 1960 avec le campus de la Bouloie. A l'époque, la préoccupation du réchauffement était déjà à l'ordre du jour puisqu'elle avait fait l'objet d'un colloque en 1960 organisé par Lamb et l'OMM à Rome, l'année des Jeux Olympiques : on s'y préoccupait déjà de l'augmentation du gaz carbonique dans l'atmosphère. Mais il est bon d'ajouter que le même Lamb, dans son compte-rendu d'un colloque tenu en Grande Bretagne en 1976 et publié dans la revue française « *La Météorologie* », indiquait que le globe terrestre n'avait subi ni augmentation ni diminution de la température de l'air au cours des dernières décennies. Comment Lamb et les autres participants avaient-ils surmonté les obstacles de l'hétérogénéité des chroniques et de leur absence sur les 2/3 marins du globe, je l'ignore. Pourquoi seulement 10 ans plus tard on observe un revirement total sur ces questions ? Il me semble que l'explication principale provient du fait qu'on n'a plus affaire à la même population de scientifiques : ceux de Lamb étaient très influencés par les observations recueillies au sol, tandis que les actuels sont plus orientés vers la physique de la haute atmosphère et la modélisation à outrance. En quelque sorte nous voilà revenus à la bifurcation constatée en France à l'issue des années 1860 entre naturalistes et astrophysiciens, opérée cette fois-ci à l'inverse. Est-ce vraiment souhaitable pour la science ?

« Que peut-on penser des écarts relevés sur un même site avant et après 1971 ? »

Ce qui précède fait la jonction avec ta seconde question, car l'abri fait partie du protocole de mesure et de l'environnement du thermomètre. D'autant que cet aspect a été normalisé par l'OMM. On voit par là que le couple thermomètre abri a beaucoup évolué dans le temps.

La finalité de l'OMM était de rendre les données comparables dans l'espace mondial. Et cette cohérence obtenue se fait au détriment de la stabilité des conditions d'obtention des chroniques ici et là. Or en matière de détection du réchauffement climatique – puisque c'est de cela qu'il s'agit depuis le début – c'est bien de longues séries stables dans le temps à tous point de vue que nous avons besoin. Et nous venons de voir l'impossibilité de fait d'obtenir ce type de chroniques.

Alors que faire, comme l'écrivait Lénine ? Ou bien plutôt, qu'ont fait les tenants de la thèse du réchauffement ? Je n'en sais fichtre rien et c'est bien là le problème. Quoi de plus facile que de se dissimuler derrière des résultats de calculs effectués avec des modèles complexifiés dont personne n'est capable de vérifier les tenants et aboutissants. A ce stade, de nombreuses remarques doivent être faites, chacune d'une portée inégale, mais nécessaires, voire indispensables.

1. Le passage obligé de la discrétisation des données. Je m'explique : je ne sais pas travailler sur une variable continue comme la température de l'air. Aussi je vais procéder à une discrétisation en faisant jour par jour du calendrier civil la moyenne du minimum et du maximum : le célèbre $T_{\min} + T_{\max}$ divisé par 2. Déjà, il apparaît un biais, car cette façon de procéder ne traduit pas fidèlement la moyenne de l'enregistrement continu sur 24 heures. Mais c'est bien sûr marginal.
2. Le rétablissement de l'homogénéité de la chronique est quasi impossible au vu de tout ce que l'on a vu précédemment. Pour reprendre Montesquieu, il y a d'un côté les lois de la nature et de l'autre il y a les lois du monde intelligent. Nous ne connaissons pas toutes les lois de la nature : on ne peut prévoir le temps que pour quelques jours avec des modèles thermodynamiques complexes utilisant les données d'observation recueillies à la surface du globe et par les satellites. Nous sommes incapables de prévoir correctement les températures et les précipitations à la surface du globe, pour ne choisir que ces 2 variables, pour les semaines et mois à venir.
3. En revanche, nous connaissons mieux les lois du monde intelligent en ce sens que les archéologues vont nous parler du concept de « *réalité augmentée* ». Je n'invente pas : j'ai vu à la télé, – ma seule source d'information scientifique avec la radio et parfois internet – une émission sur les fouilles de Leptis Magna en Libye. A

partir d'un amas incomplet de blocs de pierres taillées, les archéologues ont proposé une reconstitution plausible d'un monument érigé à l'époque romaine. Cela semble possible puisqu'ils disposent d'un faisceau d'indices sur le terrain concernant la nature géologique du matériau, la façon de découper les blocs le tout complété par ce qu'ils savent des procès de construction de l'époque à travers les récits de contemporains. Dans ce cas précis nous restons dans les limites des lois du monde intelligent. Cependant la reconstitution « plausible » évoquée plus haut peut produire des versions assez différentes d'un archéologue à l'autre. Je viens de vivre une expérience d'aménagement d'une cuisine avec un même cuisiniste et sa seule gamme de produits. Je me suis rendu compte qu'on pouvait obtenir des agencements très différents les uns des autres sur la base des mêmes appareils et des mêmes fonctionnalités. Au final, c'est le client qui choisit ce qui lui convient le mieux parmi toutes les configurations proposées dans une même gamme de prix !

4. Il n'y a pas de possibilité réelle de recourir au concept de « *réalité augmentée* » dans le cas de longues chroniques forcément hétérogènes et incomplètes : en effet, sur quelles bases fonder la reconstitution d'une chronique homogène sinon sur la connaissance des lois qui régissent le phénomène « température de l'air » ?
5. D'abord, la terre se réchauffe-t-elle ? Certes oui si l'on regarde uniquement l'état actuel de l'Arctique. Mais si on remonte suffisamment loin dans le temps, c'est-à-dire sur plus de 10 siècles, on se rendra compte qu'il existe des variations et des fluctuations très importantes à travers des récits. On se heurtera toujours à la question récurrente des chroniques d'observations de quelques natures qu'elles soient.
6. La conclusion simpliste sur le réchauffement climatique qu'on nous assène à tout instant relève d'un raisonnement finalisant. L'effet de serre est provoqué par certains gaz dont le gaz carbonique. Or la surconsommation de produits pétroliers, de charbon et de gaz naturel produit du gaz carbonique qui forme un écran et augmente l'effet de serre. Jusque là rien à dire. C'est la conclusion qui est rapidement boiteuse, parce qu'elle se fonde sur cette seule rétroaction positive : le « donc la terre se réchauffe ! » ignore complètement tout le reste, peut-être 98% de l'ensemble du système très complexe qui est l'objet de la recherche.

7. Par exemple, comment se répartissent les variations spatiotemporelles de la teneur en vapeur d'eau, gaz à effet de serre autrement plus efficace que le dioxyde de carbone ? Sans parler des particules rejetées par les volcans, de toutes les sortes d'aérosols résultant de l'activité humaine, ni de tout ce qui se passe au ras du globe en matière d'activités humaines.
8. A cet égard, j'avais suggéré en 1984 au bureau de la Société Hydrotechnique de France de consacrer les journées d'hydraulique de 1986 à l'étude de l'influence des activités humaines sur le régime des eaux, « régime » au plein sens du mot, recouvrant tous les aspects quantitatifs, y compris physico-chimiques, et dans une moindre mesure ceux de la vie aquatique, lesquels commençaient à être davantage étudiés. Mon projet a été adopté et ces journées de l'hydraulique constituèrent une première en France. Le sujet reste toujours d'une actualité d'autant plus brûlante que la croissance démographique et la pénurie énergétique sont programmées. Comment éviter cette influence, variable dans le temps et dans l'espace, des activités humaines sur des thermomètres situés sous abri à 2 mètres du sol ? Cela me semble un point essentiel pour vérifier s'il y a bien un réchauffement d'une origine différente – celle de l'effet de serre – de celles des effets directs au ras du globe. Mais est-ce une difficulté surmontable ?
9. Au cours de ma vie professionnelle, j'ai abordé la question de l'influence de l'occupation des sols, en particulier des pratiques agricoles. Suivant l'hydro schizophrénie habituelle, je m'occupais des problèmes quantitatifs et mon collègue René Delouvée des qualitatifs, nitrates et compagnie. Nous avions affaire aux services du ministère de l'Agriculture, à commencer par le service central de l'hydraulique créé au tout début des années 1960 par Darves-Bornoz dans le but de prolonger le développement du secteur agricole pour atteindre et dépasser le stade de l'autosuffisance à l'échelle de la Nation : Darves-Bornoz, alias Louis Perceval dans la presse communiste, tenait beaucoup à la réalisation du programme du Conseil National de la Résistance. Et comme l'époque était à la décolonisation et au recasement de tous les fonctionnaires de l'ancienne administration coloniale, il eut l'idée de conjuguer l'ensemble avec la création du service central et celle des Services Régionaux d'Aménagement des Eaux – les SRAE – l'ossature des futures DIREN. Je n'ai pas connu personnellement Darves-Bornoz, mais plusieurs personnes m'en ont

parlé élogieusement, notamment Jean Brachet, qui fut à l'origine de la création du PIREN¹⁰⁵ Seine. Je fais volontairement cette digression parce que ses successeurs ne furent pas de la même trempe, notamment au début des années quatre-vingt comme nous le verrons plus bas. A cette époque, la transformation des paysages agraires battait son plein : les remembrements avaient commencé pendant les années cinquante et les changements culturels avaient suivi, principalement le drainage agricole, qui concernait en France 70 000 hectares par an (je cite de mémoire). Les zones bocagères étaient transformées, drainées et mises en grandes cultures. Une conséquence immédiate de ces transformations fut la modification du régime hydrique et la nécessité de mettre en place des systèmes d'irrigation. Mon attention avait été attirée par la sécheresse de 1976, que j'avais bien étudiée sur le bassin Seine-Normandie, puisque je continuais à suivre le réseau pluviométrique complémentaire, tout en participant à des études hydrologiques et à la programmation des barrages réservoirs du bassin de la Seine en collaboration avec le service éponyme de l'institution interdépartementale. L'ampleur des assecs de l'amont des cours d'eau était déjà préoccupante avant de devenir récurrente au fil des ans et de la croissance des transformations. Mais la première question posée concernait notre capacité à démêler toutes ces influences prises une à une : c'est pourquoi dès le milieu des années 1970 plusieurs études concernèrent l'influence du drainage où l'on retrouvait les services précités et le CEMAGREF, présenté comme la référence scientifique. Tout a foiré parce que chaque protocole expérimental n'a pu être mis en place correctement, et ce pour diverses raisons plus ou moins obscures : seul le bassin du ru de Ronchères dans la Puisaye fut équipé normalement grâce à la ténacité de Michel Marion, l'hydrologue du SRAE Bourgogne, transfuge de l'ORSTOM. Mais il faut bien l'avouer, le défi d'identifier l'ordre de grandeur de l'influence du drainage reste toujours d'actualité du fait des autres transformations concomitantes. Si je raconte tout cela, c'est qu'on avait fait l'impasse sur une des conséquences du drainage, recherchée comme un objectif dès le milieu du 19^{ème} siècle, d'abord chez les Anglais puis chez nous. Le premier constat fait par les agronomes de cette époque était que les terres humides étaient des terres froides, impropres à la culture. En les drainant, on assurait un échauffement des sols propice à la mise

105. Programme Interdisciplinaire de Recherches sur l'Environnement.

en culture. C'était la raison première des travaux d'assainissement agricole, qu'il convient de convoquer à nouveau dans le débat sur le réchauffement. Surtout au vu des surfaces incriminées.

10. Une autre modification de l'occupation des sols, en concurrence avec la précédente, est la réduction des surfaces agricoles liée à l'extension des agglomérations, de l'habitat en général et des voies de communications. En France on cite le chiffre de 5 000 km² tous les 10 ans pour évaluer le phénomène en cours. C'est considérable.
11. De tout ce qui précède, il faut bien s'inquiéter de la répercussion sur les observations de température à 2 mètres du sol. L'affirmation, admise depuis quelques décennies, que l'observateur est dans l'observé, doit être complétée en y incluant l'ensemble des matériels et protocoles mais aussi l'environnement de l'observation qui est loin d'être constant comme nous venons de le voir.
12. Nous sommes donc confrontés à un problème quasi insoluble si le bruit provenant du système d'observation au fil des décennies affecte l'ordre de grandeur de la variation du phénomène étudié, en l'occurrence les températures de l'air à 2 mètres du sol.
13. Et sur les océans qui occupent environ 2/3 de la surface du globe où ce type d'observation fait cruellement défaut ?

Complétons la question de Lénine en l'adressant aux honnêtes gens : « que faire dans ce vaste foutoir ? ». Là je me référerai à Montaigne dans « *de la présomption* »¹⁰⁶

« Ainsi, je ne suis propre qu'à suivre, et me laisse aisément emporter à la foule : je ne fie pas assez en mes forces pour entreprendre de commander, ni guider ; je suis bien aise de trouver mes pas tracés par les autres. S'il faut courir le hasard d'un choix incertain, j'aime mieux que ce soit sous tel, qui s'assure plus de ses opinions et les épouse plus que je ne fais les miennes, auxquelles je trouve le fondement et le plant glissant. Et si, ne suis pas trop facile au change, d'autant que j'aperçois aux opinions contraires une pareille faiblesse. Notamment aux affaires politiques, il y a un beau champ ouvert au branle et à la contestation. [...] »

106. Montaigne « essais 2 » pp 362-363 Le Livre de poche, Librairie Générale Française 1972. Je préfère la langue originale de Montaigne à une traduction en français moderne dont la compréhension pose déjà difficulté à la grande masse de nos jeunes gens.

Un savant personnage de notre temps dit qu'en nos almanachs, où ils disent chaud, qui voudra dire froid, et, au lieu de sec, humide, et mettre toujours le rebours de ce qu'ils pronostiquent, s'il devait entrer en gageure de l'événement de l'un ou de l'autre, qui ne se soucierait pas quel parti il prît, sauf ès choses où il n'y peut échoir incertitude, comme de promettre à Noël des chaleurs extrêmes, et à la Saint-Jean des rigueurs de l'hiver. J'en pense de même de ces discours politiques. »

Mais formulons la question différemment à l'intention des gens de pouvoir : « que faire de ce vaste foutoir ? ». Et là il semble qu'il y ait le choix entre au moins 3 types de possibilités :

- Je laisse faire parce que ça ne me dérange pas, mais surtout parce que les discours culpabilisant le citoyen de base comme responsable du réchauffement, ça m'arrange et ça me dédouane.
- J'en remets une couche parce que ça peut rapporter dans le domaine de la géopolitique : plus je mets la pression sur les autres Etats plus je vais dans le sens de l'établissement d'une nouvelle religion commune à l'humanité toute entière et supplantant les actuelles.
- J'en ai marre de me faire manipuler, alors je décide :
 - a. de réduire les crédits de 20% sur ces recherches qui tournent en rond depuis plusieurs années. Elles ont certes eu un caractère heuristique, mais quand je vois tous ces clans se partager la manne financière, en particulier ceux des économistes, sur lesquels je ne peux me fier par ces temps de crise, je me dis qu'on peut faire des économies.
 - b. de répartir le reliquat en 2 parts égales, l'une alimentant l'actuel GIEC pour ne pas faire de peine aux autres Etats, l'autre faisant appel à ceux convaincus ou non de leur doute sur les conclusions du GIEC.
 - c. et par la même occasion j'aurai créé les emplois collatéraux d'experts de tout poil penchés sur ces flux migratoires d'hérétiques fuyant le dogme avec l'espoir d'assurer leur solde.

Voilà, cher ami, l'expression de mon doute. Avec ses deux faces : la fatigante, celle qui incite à me réfugier dans un agnosticisme de nécessité ; la rassurante, celle des générations futures devant l'éternité des travaux pour comprendre les lois de la Nature, et du monde intelligent.

Souvenirs affectueux

J'ai une grande estime pour toutes les personnes citées dans les pages précédentes et avec lesquelles j'ai travaillé ou simplement échangé. Je ne peux en dire beaucoup plus sur chacune d'entre elles. Aussi je n'évoquerai que la mémoire de Jean Tixeront ce qui me permet de faire le lien entre mes années passées en Tunisie et celles de mes débuts à l'agence financière de bassin. Ce qui suit résulte de ce que j'ai appris de lui à son contact.

D'origine auvergnate, dès sa sortie de l'école des Ponts et Chaussées il participa activement à l'aménagement hydraulique du haut bassin de la Medjerda pour fournir de l'eau potable à Tunis. Il devint par la suite responsable du Bureau de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques (BIRH) de Tunisie. Durant la seconde guerre mondiale il fut un des chefs de la Résistance à l'Occupant italien qui avait remplacé le protectorat français. A ce titre il participa à l'organisation de la bataille de Medjez el Bab qui libéra l'Afrique du Nord des armées de l'Axe. C'est peu après qu'il accueillit dans son service François Valiron, jeune ingénieur des Ponts et Chaussées. Il s'intéressait beaucoup aux travaux hydrauliques de l'époque romaine et pratiquait la vision stéréoscopique des photographies aériennes. Il m'avait montré les restes des aménagements en terrasses sur des collines escarpées qui avaient fait de la Tunisie d'alors le grenier à blé de Rome. Mieux : il m'expliqua la construction d'El Djem, sorte de Colisée édifié au milieu d'une plaine désertique. Grâce aux photos aériennes il avait repéré le tracé d'un canal que les romains avaient construit depuis la mer pour amener par voie d'eau les matériaux de construction prélevés dans les roches du littoral nord de la Tunisie. Ensuite les romains avaient consciencieusement rebouché le canal. Il écrivit des articles pour la revue de l'AIHS. C'était un hydrologue de renom.

Au moment du conflit de Bizerte en 1961 il était président de l'association des français de Tunisie devenue indépendante en 1957. Ces résidents possédaient des armes de chasse, voire de guerre pour certains d'entre eux. Comme ils avaient peur d'être poursuivis dans le cadre d'un conflit qui les dépassait, il avait été convenu qu'ils les déposent au domicile de Jean Tixeront. Résultat : Tixeront fut arrêté, jeté en prison plusieurs semaines puis expulsé vers la France. Quelques mois plus tard

Habib Bourguiba lui envoya un émissaire pour qu'il revienne : Jean Tixeront n'est jamais retourné en Tunisie.

J'ai fait sa connaissance en 1967, lorsque François Valiron lui demanda de piloter la réalisation de la monographie du bassin Seine-Normandie. Je le revois toujours vêtu simplement avec sa cigarette roulée sur le côté des lèvres dont les brins de tabac tombaient et perçaient sa cravate ou sa chemise. J'ai beaucoup appris à ses côtés : sa ténacité, son obstination à obtenir ce qu'il voulait m'ont beaucoup servi dans le pilotage du réseau pluviométrique complémentaire et de tous les projets que j'ai eus en charge par la suite. Un jour, j'ai réussi à lui faire faire une pause et à l'emmener dans le Morvan, sur le bassin de la Cure puis à une réunion dans le parc naturel régional. Je ne sais plus le thème exact : un peu de climatologie et de biogéographie. Cela s'est conclu par une petite fête à la maison forestière du Breuil. C'était au début de l'été, il faisait beau et autour d'un feu de camp nous avons admiré le lever du soleil. Tout le monde était heureux.

Jean Tixeront est mort quelques années plus tard sans avoir pu terminer la monographie du bassin Seine-Normandie qui restera définitivement inachevée.

Sigles

AFAS :	Association Française pour l'Avancement des Sciences
AIHS :	Association Internationale d'Hydrologie Scientifique
ARHMA :	Annuaire du Réseau Hydrométrique du Ministère de l'Agriculture. Cet acronyme recouvre toute une chaîne de traitement aboutissant à une banque de données hydrométriques
ARAMIS :	acronyme donné au réseau radar de la Météorologie Nationale pour observer les précipitations atmosphériques
BEP :	Bureau d'études permanent, rattaché au SPEPE
BIRH :	Bureau de l'Inventaire des Ressources Hydrauliques de Tunisie
BRGM :	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEA :	Commissariat à l'Energie Atomique
CEMAGREF :	Centre d'Etudes du Machinisme Agricole du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
CERGR :	Centre d'Etudes et Recherches du Génie Rural de Tunisie. Ce centre était situé dans le périmètre de l'école d'agriculture de l'Ariana
CNED :	Centre National d'Enseignement à Distance.
CNES :	Centre National d'Etudes Spatiales
CNFSH :	Comité National Français des Sciences Hydrologiques
CNRS :	Centre National de la Recherche Scientifique
DATAR :	Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale

DGRST :	Délégation Générale de la Recherche Scientifique et Technique
DIREN :	Direction Régionale de l'Environnement
DTG-EDF :	Division Technique Générale d'Electricité de France dont le siège et les services étaient situés à Grenoble
EDF :	Electricité de France
EDF Etudes et Recherches :	Etudes et Recherches d'Electricité de France dont le siège était dans l'île de Chatou dans le département des Yvelines. Une antenne a existé à Lanobre dans le Cantal, à proximité du barrage de Bort-Les-Orgues pour gérer les stations hydrométriques de recherche sur les débits
GIEC :	Groupe International d'Etudes du Climat
HYDRO :	Banque nationale de données hydrométriques résultant de la fusion avec la banque ARHMA de toutes les données hydrométriques produites par d'autres organismes que le ministère de l'Agriculture, comme les circonscriptions électriques, les services d'annonce des crues du ministère de l'Equipement, et la DTG-EDF
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
INSEE :	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
IRD :	Institut de Recherche sur le Développement. Cet organisme a remplacé l'ORSTOM
LANDSAT :	Système satellitaire américain d'observation de la terre
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
NSS :	Natures Sciences et Sociétés
OMM :	Organisation Météorologique Mondiale
ORSTOM :	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer
PIREN Seine :	Programme Interdisciplinaire de Recherches sur l'Environnement du fleuve Seine

Sigles

PMF :	Probable Maximum Flood
PMP :	Probable Maximum Precipitation ou Précipitation Maximale Probable
RPC :	Réseau Pluviométrique Complémentaire de celui de la météorologie nationale sur le bassin Seine Normandie
SCET COOP :	Société centrale pour l'équipement du territoire, coopération
SCS :	Soil Conservation Service, service rattaché à l'USDA
SHF :	Société Hydrotechnique de France
SODETEP :	Société de Développement des Techniques d'Etudes des Précipitations
SPEPE :	Secrétariat permanent d'étude des problèmes de l'eau, rattaché à la DATAR
SPOT :	Satellites Pour l'Observation de la Terre
SRAE :	Service Régional d'Aménagement des Eaux. Ces services ont été créés par le ministère de l'Agriculture au début des années 1960, puis intégrés dans les DIREN
TUC :	Temps Universel Compensé
USDA :	United States Department of Agriculture. C'est le ministère de l'agriculture des Etats Unis

Remerciements

Tout au long j'ai eu le soutien chaleureux de mes amis Armand, Pierre et Yves, malgré leur éloignement : qu'ils en soient affectueusement remerciés.

La présence constante d'Andrée mon épouse, et ses conseils m'ont permis d'arriver au terme de cette traversée.

Un mot amical pour Dominique mon partenaire de bridge que j'ai lâchement abandonné et pour Mylène son épouse : sa lecture cobaye de mon brouillon m'a convaincu de l'efficacité des barrières dressées par notre enseignement qui met en quarantaine les littéraires dès qu'on évoque quelque problème scientifique.

Et mille mercis aux Editions Johanet qui ont osé soumettre ces textes au jugement du lecteur.

Index

A

- abaque : 64
- abats : 103
- Achères, 137, 182
- activités humaines : 90, 163, 172, 198
- administration coloniale : 127, 198
- Adour-Garonne : 19
- aérodromes : 193
- AFAS : 195, 205
- Afrique centrale : 112
- Afrique du Nord : 202
- Afrique Occidentale : 112
- agence de l'eau Seine-Normandie, :
5, 7, 8, 31, 116
- agence financière de bassin ; voir
agence de l'eau : 84, 179, 202
- agences fédérales : 88
- agglomération : 35, 90, 121, 182, 193,
195, 200
- agnosticisme : 201
- agronome : 15, 46, 94, 97, 156, 199
- AIHS : 149, 202, 205
- Aire : 133
- Aisne : 133
- aléatoire : 52, 53, 55, 75, 91, 93, 151,
164, 169
- Algérie : 115
- alimentation en eau : 17, 29, 115, 137,
160, 182, 183
- Allemagne : 183
- Alpes du Sud : 123
- Alpes : 24, 25, 60, 123
- Alrance : 66, 110
- aménagement et gestion de l'eau :
147
- analogie : 42, 110, 180, 181
- Angkor : 169
- Angleterre : 23, 32
- Angot, A. : 26, 46, 53, 193
- annonce des crues : 78, 79, 84, 206
- annuaire météorologique de France :
29
- antécédents de pluie : 152
- Antilles : 87
- Antony : 134
- Apennins : 123
- Aragon : 173
- archéologues : 169, 196, 197
- archive manuscrite de l'observateur :
30, 83
- Archives nationales : 88
- archives phénologiques : 88
- Arctique : 197
- Ardennes : 43, 59
- ARHMA : 87, 205, 206
- Arizona : 113
- Arléry R. : 83, 84, 86, 125, 126, 192
- ARTE : 9, 169
- Artois-Picardie : 19
- assainissement : 4, 17, 19, 33, 35, 79,
86, 90, 134, 137, 138, 142, 143,
147, 179, 182, 200
- assecs : 164, 199

astrophysicien : 92-95, 97, 162, 163, 165, 192, 195
atlas de la monographie Seine-Normandie : 74
atlas de la Nouvelle Calédonie : 177
atlas de la Polynésie française : 105
atlas hydrologique du bassin de l'Al-lier : 79
atmosphère : 6, 7, 92-94, 96, 102, 103, 163, 164, 166, 168, 170, 172, 195
Aube : 40, 84, 112
Audinet : 77, 148
au vent : 25, 101, 102, 194
Auvray C. : 18
Aveyron : 66
Avias : 78
aviation : 192

B

Bachoc : A., 142
bague de réception : 47, 60, 101, 136, 156
baie du Mont Saint Michel : 103
baignoire : 180
Banal : 90
bandes magnétiques : 54, 86, 134
banque de données sur l'eau : 5
banquette (de rétention) : 122, 158, 187
barbarie du spécialisme : 95, 105, 169
barrages de la navigation : 17
barrages réservoirs : 57, 73, 84, 110, 133, 179, 183, 199
Barré de Saint Venant : 181
Bar-sur-Aube : 40
Bassée : 180
bassin d'alimentation : 123, 158, 159
bassin forestier : 158, 186, 187
bassin hydrographique : 30, 159
bassin Seine-Normandie : 6, 179, 184
bassins versants expérimentaux : 16, 157, 158
bâtons lestés : 181
Baumgartner et Reichel : 161
Bayes : 77
Beauce : 72, 141, 159, 164
Belgrand E. : 30, 31, 45, 52, 60, 84, 86, 101, 132, 137, 138, 179, 181
Bénévent : 25
Benzécri : 54
BEP ; bureau d'études permanent : 83, 205
Bercy : 88
Berkalof : 78
Bernier, J. : 77
Besançon : 5, 9, 15, 20, 61, 105, 177, 195
bichromate de sodium : 183
bief de partage : 65
biefs canalisés : 181
Bièvre : 132
bilan hydrique global : 94, 161, 163
bilan hydrique : 94, 155, 156, 161, 162, 163
bilan hydrique de l'atmosphère : 163
bilan hydrologique des terres émergées : 163
bilan hydrologique : 105, 155, 157, 158, 160, 163
bilan radiatif global : 94
bilan thermique : 163
BIRH : 202, 205
biseau salé : 183
Bizerte : 202
Boiret, P. : 88
Bondy : 104
Bonnet J. : 64, 133
Bonvallot J. : 105, 177
bordereau de saisie informatique : 38
Bort les Orgues : 20, 116, 185, 206
Bouajila : 177, 185-188
bouchage (du pluviographe) : 128
Bourguiba H. : 203
Brachet J. : 199
Brel J. : 11

- Brémond R. : 125
 Brenne : 137
 Bretagne : 10, 19, 101, 103, 128, 159, 195
 BRGM : 7, 24, 31, 34, 78, 205
 bruit : 51, 58, 61, 91, 102, 200
 Brunet-Moret : 48, 49
 bucketsurvey : 111, 136
 Bureau central de la météorologie : 30, 45, 127
 bureau de l'eau : 39, 86, 88, 103
- C**
- Caen : 182, 183
 Caisse des dépôts et consignation : 20
 Calvi Y. : 194
 Canada : 4, 80, 167
 canal de Bourgogne : 29, 59
 canal de la Marne à la Saône : 65
 canal de la navigation : 106
 canicule : 96
 caporalisation des jours de pluie : 39
 capteur : 110, 125, 128, 129, 130, 136, 170
 Caquot : 77, 79, 132, 133, 134, 135
 caractère stable : voir stabilité du climat : 95
 Caradec J-M. : 101
 carnet d'observation : 37
 carte millésimée des isohyètes : 42
 carte pluviométrique de référence : 23
 cartes perforées : 38, 41, 83-86, 112
 case lysimétrique : 155, 170
 cassure : voir saut : 47
 Castany G. : 29, 78
 cataclysme : 55
 cause à effet : 118, 151, 165, 172
 Cazenave : 90
 C dans l'air : 194
 CEA : 21, 205
 cellule de Hadley : 93
 cellules de Ferrel : 93
 cellules polaires : 93
 CEMAGREF : 110, 134, 199, 205
 CERGR de Tunis : 57, 78, 86, 127, 131
 césium : 167
 Cévennes : 40, 123
 Chalaux : 194
 Chalian G. : 10
 Chambéry : 24
 Champ de Mars : 138
 champ des vitesses : 182
 changement climatique : 4, 6, 7, 9, 65, 74, 169, 177, 191, 194
 changement de finalité : 192
 changements cultureux : 199
 changements institutionnels : 192
 Chaumeçon : 26, 194
 Chée : 110
 Cherbourg : 26, 194
 Chéret Y. : 18
 Chouraqui A. : 72
 chronique : 23, 35, 45-49, 51, 55, 58-60, 67-69, 74, 85, 87, 130, 135, 136, 143, 153, 169, 171, 172, 191, 192, 194-197
 circonscription électrique : 34, 41, 182
 circulation atmosphérique : 93
 Clamecy : 179
 classification des sciences : 106
 Clergeot P. : 89, 141
 climatologie : 5, 9, 15, 21, 23, 72, 78, 86, 96, 97, 103, 125, 133, 145, 170, 192, 203
 climatologue : 7, 26, 51, 92, 97, 104, 169, 191
 CNED : 97, 205
 CNES : 89, 141, 205
 CNRS : 5, 8, 205
 CNFSH : 8, 105, 109, 155, 205
 CO : voir dioxyde de carbone : 92, 164, 165, 169, 198
 Codification hydrologique : 180

- coefficient d'épicentrage : 110, 180
coefficient de corrélation : 112, 119
coefficient de ruissellement : 16, 148, 149, 157, 158
coefficient de sécurité : 124, 138
coefficient de variation constant à 0,18 : 61, 81, 92
Cogombres : 127
Coindre : 116
Colisée : 202
collectif mensuel départemental : 31, 39
collectivités locales : 17
Collin : 29
Colmar : 17
Cologne : 7
colonel Delcambre : 30, 192
Colorado : 15, 80, 163
coloration : 183
Combeau : 104
comité de lecture, 8, 89
Comité français des grands barrages : 116, 119
Commissariat au Plan : 8, 163
commune : 8, 26, 30, 31, 42, 45, 49, 85, 96, 110, 119, 201
complexe sol végétation : 152, 159, 166
composantes principales : 147
Comte A. : 106
concentration en matériau solide : 186
concomitance : 96
Concours Lépine : 102
condensation : 25, 61, 93, 95
conférence de Rio : 6
conférence de Villach : 7, 92, 169
confiance : 58, 67-69, 73, 74, 118, 120, 149, 153, 184, 185, 188, 189
connaissance générale : 35
Conrad : 61
conseil général : 19, 36
Conseil National de la Résistance : 198
Conseil supérieur de la météorologie : 36, 141, 143
conservation des eaux et du sol : 20, 122, 158
Constans : 142
constante solaire : 91, 93, 165
continent (terres émergées) : 162
contractuels : 19
contre-courants : 182, 183
Cormary Y. : 15-18, 20, 57, 79, 80, 85, 148, 149, 152, 158, 186
Cornet J. : 34
corporatisme : 18
corps techniques de l'Etat : 18, 34, 90
corrélation : 14, 39, 57, 59, 69, 80, 111, 112, 119, 135, 144
Corse : 18, 19, 167
Cosandey C. : 8, 155
Cotentin : 26
Coutagne A. : 77, 107
Coyne & Bélier : 57
craie (nappe de la) : 159
Crescent : 13, 194
Creutin D. : 144
croissance démographique : 198
crue de projet : 79, 116
crue maximale probable : 153
Cure : 13, 194, 203
cycle : 5, 15, 20, 51-53, 55, 75, 92, 96, 105, 161, 163, 164, 168, 177
Cycle diurne : 52, 96
Cycle saisonnier : 52, 53, 183
- D**
- Dammartin en Goële : 142, 143
Danloux J. : 177, 178
Dargent M. : 53, 54
Darves-Bornoz : 198
DATAR : 20, 205, 207
David P. : 142
Davy L. : 39
débit d'étiage : 9, 26, 183

Index

- débit de pointe ou pointe de crue : 16, 120
débit-mètre : 185
débit solide : 157
découpage mensuel : 53
découpage semestriel : 52
déficit d'écoulement : 77, 107, 112, 158
Delouvée, R. : 198
Delouvrier P. : 33
dendrochronologie : 171, 172
densité du réseau : 110, 136
déplacement (du pluviomètre) : 60
déroulement de la pluie : 125, 129, 131, 132
Der Spiegel : 7
dessin de Dubout : 34
déterminisme : 61, 74, 81, 96, 151, 166, 177
Dettwiller J. : 195
déversoir (triangulaire) : 158, 186
déversoir d'orage : 179
DGRST : 79, 206
dioxyde de carbone : 92, 164, 165, 169, 198
DIREN : 198, 206, 207
discrétisation des données : 196
dispersion : 46, 59, 60
dissipation de l'énergie : 164
Djouggar : 16, 156, 157, 186, 187
Dol de Bretagne : 103
donnée manquante : 46
données non officielles : 111, 123
données pluviographiques : 35, 87
données publiées : 192
Dordogne : 20, 78, 116
Dorsale tunisienne : 16, 21, 156, 177
doubles cumuls : 47, 48, 51, 60
drainage : 19, 147, 182, 199
Dreux : 23, 68, 72
Dreyfus M. : 20
droite de Henry : 64
DTG EDF Grenoble : 43, 61, 103, 116
Duband : 78, 116, 120
Dubreuil P. : 147
Ducastelle C. : 54
Duclos J. : 135
Dutillet J.L. : 87
dynamique des fluides : 96
- ## E
- eaux pluviales : 4, 33, 35, 77, 132, 133, 137
écart-type : 46, 49, 59, 60, 61, 63, 64, 67, 68, 80
échantillon (prélèvement d') : 104, 183
échelle hémisphérique : 66, 92
échelle limnimétrique : 186
éclipses : 95
école de la météo : 83, 87
école des Mines : 7
école des Ponts et chaussées : 202
écoles normales : 193
économistes : 201
écoulements : 35, 71, 77, 118, 138, 156, 182-184
EDF : 6, 15, 20, 21, 36, 41, 43, 61, 66, 77, 79, 90, 103, 115, 116, 127, 129, 185, 206
effet de paroi (ou de bordure) : 156
effet de serre : 7, 75, 92, 94, 165, 169, 172, 197, 198
effet rétroactif négatif : 164
Eiffel G. : 138
El Djem : 202
El Niño : 92
électronique Marcel Dassault : 112
Elysée : 179
empirisme : 136
éoliennes : 143
éprouvette : 37, 38, 47, 60, 104
équipements hydroélectriques : 66

ergodicité : 61
Erica (cyclone) : 102, 103
érosion des sols : 5, 15, 20, 22, 131, 147, 156
espacement des postes : voir densité : 112
Estienne : 88
Etablissement des études et recherches de la météo : 89
établissements Richard : 126-128
Etat : 17-19, 32-34, 84, 87, 90, 115, 116, 133, 137, 138, 179, 193, 201
Etats-Unis : 16, 79, 80, 88, 111, 117-119, 125, 126, 131, 163, 207
étiage : 9, 26, 73, 78, 84, 159, 160, 179, 180-184
Etudes et recherches EDF Chatou : 6, 15, 20, 66, 77, 127
Eure : 60
Europe occidentale : 66, 145
Europe : 4, 29, 30, 66, 142, 145, 169
évacuateur de crues : 84
évaporation, 30, 93, 104, 106, 127, 150, 152, 157, 159-166, 170
éapotranspiration : 79, 159
excès d'écoulement : 105, 107
exploitation agricole : 94
exposition coloniale : 125
extrême Nord canadien : 80

F

Fabret C. : 78
façade européenne atlantique : 91
Fatouville : 60
faune halieutique : 179
Ferré L. : 191
feuille de relevés (ou d'observation) : 38
Figuet C. : 61
Fleury/Orne : 183
fleuve Jaune : 163
Floch G. : 142

fluctuations climatiques : 171
fluorescéine : 183
flux : 92-94, 101, 164-166, 201
foehn : 26
fonctionnaires : 18, 19, 198
Fontainebleau : 88
force de Coriolis : 165
Fort Saint-Cyr : 83, 85, 87
fourchette (de confiance), 72, 73, 118
Fourier : 53, 92
fractals : 142
France métropolitaine : 31, 134, 138, 192
France septentrionale : 107
France : 4, 5, 6, 8, 9, 17, 18, 23, 24, 26, 29-32, 53, 59, 77, 79, 80, 88, 92, 107, 109, 110, 112, 115, 119, 121, 123, 133, 134, 136-138, 142, 163, 191-193, 195, 198, 199, 200, 202, 206, 207
Francfort : 7
Franche-Comté : 10, 61
Francou : 78
Fréchet : 77, 119, 121
Fréjus : 115
fréquence annuelle : 121, 123, 136
fréquence au dépassement : 64
fréquence centennale : 119
fréquence d'occurrence : voir probabilité : 118, 123, 136, 138
fréquence décamillénaire : 119, 120
fréquence décennale : 118, 133, 136
fréquence des pluies extrêmes : 116
fréquence rare : 117, 123, 127

G

Galton : 57, 58
Gap : 24
Garnier M. : 30, 46, 57, 59, 68
Gauss : 57-59, 80
Gaxotte P. : 102

gaz carbonique : voir dioxyde de carbone : 195, 197
géochimie : 150
géographe : 9, 21, 26, 77, 78, 94, 97
géomorphologie dynamique : 5, 15, 20, 148
géophysique : 150
GFHN : 8
GIEC : 8, 153, 166, 172, 178, 194, 201, 206
Gilet M. : 141
glaciers : 80, 166
Glangeaud : 20, 78
globe : 6, 10, 13, 55, 59, 61, 75, 91-95, 97, 101, 127, 129, 152, 155, 161-166, 168, 169-172, 195, 196, 198, 200
Goubet A. : 78
gouttière : 125, 156, 157
gradex : 78, 116, 118, 119, 121, 122-124, 138, 157
gradient de température : 193
gradient pluviométrique : 25, 27, 42, 145
Grande Bretagne : 195
Grande Guerre : 30, 37, 73, 117, 135, 192
grandes cultures : 199
Greizes : 78
Grenelle : 86
Grenoble : 24, 41, 77, 80, 129, 144, 206
Grésivaudan : 24
Grisollet : 125-127, 133, 134, 136, 137, 138, 139
Grosse J-Y. : 39, 61
guerre en Algérie : 115
Guillot P. : 41, 43, 60, 78, 84, 90, 91, 110, 116, 119, 120, 122, 123, 138
Guiscaffré J. : 87
Gumbel J. : 77, 116-122

H

H flume : 185
Handbook of meteorology : 61, 94, 162
Hassan : 186, 187
Haut Follin : 23, 26, 72
Haut Morvan : 72, 193
Haute Marne : 40
hauteur durée fréquence : 123, 125, 133
hauteur surface fréquence : 136
Helsinki : 78
hémisphères : 93, 102
Hershfield D. : 111-113, 116, 117, 119, 153
Hessel S., 9
heures de début et de fin : 132
heuristique : 201
homogénéité (d'une chronique) : 48, 49, 60, 196
horsain : 121
Hôtel de Ville : 30, 85
humidité des sols : 150
hydrauliciens : 6, 16, 105, 120, 137, 148, 187
HYDRO : 87, 206
hydro climatologie : 5, 15, 72, 78, 133, 145
hydro climatologue : 7, 51, 104, 191
hydrogéologie, 20, 29
hydrogéologue, 34, 78
hydrogramme de crue : 137
hydrogramme unitaire, 149
hydrologie : 6, 8, 9, 16, 23, 36, 77, 80, 84, 85, 88, 90, 99, 105, 111, 113, 116, 120, 126, 133, 134, 136, 141, 143, 147-153, 155, 161
hydrologie appliquée : 77
hydrologie physique : 151
hydrologie stochastique : 151
hydrologie urbaine : 126, 136

hydrologue : 18, 39, 46, 48, 52, 71, 78, 94, 96, 97, 105, 112, 116, 117, 128, 136, 139, 148, 149, 170, 191, 199, 202
 hydrométrie : 8, 77, 78, 85, 171, 180
 hydro schizophrénie : 84, 198

I

IIBRBS : 179
 Île de France : 109, 110, 133, 134, 136, 137, 138
 imperméabilisation des sols : 135
 index d'agressivité des pluies : 21
 indicateurs pluviométriques : 153
 influence des activités humaines sur le régime des eaux : 90
 influence lunaire : 55
 INRA : 21, 79, 155
 INSEE : 85, 206
 intensité (de la pluie) : 128, 129
 intensité maximale : 102, 132
 internet : 7, 10, 61, 88, 112, 145, 150, 155, 161, 196
 interpolation : 45, 46, 59, 60
 intervalle de confiance à 68% : 68
 intervalle de confiance à 99,7% : 68
 intervalle (fourchette) de confiance à 95% : 73, 74
 inventaire national de la pollution : 126
 IRD : 87, 105, 113, 147, 177, 206
 irrigation : 4, 19, 20, 57, 115, 141, 147, 156, 160, 163, 164, 182, 199
 iso fréquence : 64, 65, 68
 isohyète : 6, 25, 26, 27, 42, 74, 109, 145
 isohypse, 24, 25

J

Jacquet J. : 6, 20, 66, 90, 106

jaugeage chimique : 183
 jaugeage volumétrique : 182
 jaugeage : 20, 26, 34, 35, 42, 72, 74, 77, 78, 86, 158, 182, 183, 185, 194
 Jésus-Christ : 53
 Johansen : 126, 134
 Journées de l'hydraulique : 90, 198

K

Kandel R. : 6, 7
 Kazan E. : 55
 key raingage : 111
 Khmers : 169
 Klemes V. : 9, 147, 149, 150, 153
 Koestler A. : 8
 Kohler : 148

L

Laboratoire d'hydrologie mathématique de Montpellier : 6, 85, 134
 lac de barrage hydroélectrique : 41, 103
 lac de la Forêt d'Orient : 110, 179, 180
 lac des Settons : 59
 lac du Der : 110, 179
 lâcher : 73, 125, 179, 180
 lâchure : 179, 180, 181, 182
 lac Mead : 15
 Laganier R. : 8, 9
La Houille Blanche : 6, 53, 66, 89
 Lamb : 24, 195
 lame d'eau annuelle en mm : 72
 lame d'eau écoulée : 15, 16, 71, 110
 lame d'eau évaporée : 156, 168
 lame d'eau précipitée : 16, 34, 35, 102, 110-112, 136, 137, 159
La Météorologie : 27, 32, 89, 134, 195
 LANDSAT : 141, 206

Lanobre : 185, 206

Le Berre : 32, 33

Lefevre J. : 128

Lefrou C. : 83, 171

Lénine : 196, 200

Lenoir Y. : 7, 8, 162

Leptis Magna : 196

Leroy-Ladurie E. : 79

Le Verrier : 192

Leviandier T. : 110

L'Hôte, 109, 136, 179

Libération : 192, 193

Libye : 196

Liernais : 60

limnigramme : 42

limnigraphe : 185, 187

lindane : 167

Linsley : 148

lit majeur : 148, 180

lit mineur : 180, 181

Robert A. : 15, 57, 79, 85

log Pearson III : 117

loi de probabilités : 80, 81, 118, 120

Loire-Bretagne : 19, 128

lois d'infiltration : 152

lois de conservation de masse et
d'énergie : 151, 152

lois de la Nature : 196, 201

lois du monde intelligent : 196, 197

longue série : voir « chronique » : 58

loi sur l'eau du 16 décembre 1964 :
17, 19, 33, 34

Lorient : 127

Loriferne H. : 133, 135

Lortet Dr. : 30

Lovejoy S. : 142

Loye Pilot : 167

Lucido : 15, 16

Lugiez J. : 77

Lutèce : 137

Lyon : 24, 46

M

Maghreb : 20

maître d'œuvre : 116, 124, 193

maître d'ouvrage : 17, 124

Malpasset : 115

Manche : 26, 42, 194

Mandelbrot B. : 81

marées : 95, 183

Margat J. : 29, 78, 163

Marine nationale : 78, 142

Marion M. : 199

Mariotte E. : 29

Marne : 4, 40, 64, 65, 84, 110, 112,
179, 180, 182

Maroc : 57

Martins Ch. : 9, 30

Marx K. : 11

Maryland : 111

masses océaniques : 92, 165, 172

Massiac : 60

Massif central : 60, 116

massif de la Chartreuse : 24

Masson J.-M. : 6, 15, 21, 53, 57, 61,
69, 79, 85, 127, 131, 132, 136

Mathieu : 61

Mazerand : 77

mécanique céleste : 95, 96

mécanographie : 41, 42, 85, 112

médiaterre (site internet) : 7, 162

Méditerranée : 18, 19, 115, 177

Medjerda : 202

Medjez el Bab : 202

mer du Nord : 91

mesurage : 5, 29, 47, 51, 52, 78, 91,
94, 103, 105, 126, 128, 129, 138,
143, 144, 149, 150, 152, 153,
165, 166, 171, 181

mesurer l'eau : 194

mesures en rivières et en réseau d'as-
sainissement : 90

mesures piézométriques : 159

métaux lourds : 167

- Météo-France : 32, 191
 Météorologie (Météo) nationale : 6, 23, 24, 27, 31-33, 35-37, 40, 42, 43, 45, 46, 57, 68, 86, 87, 103, 109, 130, 141, 142, 192, 205, 207
 météorologiste (météorologue) : 39, 95
 méthode d'échantillonnage : 81, 119
 méthode de Monte Carlo : 80
 méthode du gradex : 78, 118, 123, 124, 138, 157
 Métropole : 107, 192
 Meudon : 8
 Meuse : 18, 51, 128, 132
 micro-organismes : 168
 Milankovitch M. : 52, 53, 55
 Miliane : 177, 186, 187
 ministère de la Coopération : 105
 ministère de la Défense : 192
 ministère de l'Agriculture : 34, 79, 87, 198, 206, 207
 ministère de l'Environnement : 87, 147
 ministère de l'Equipeement : 34, 78, 79, 206
 ministère de l'Industrie : 34, 78
 ministère des Finances : 36, 172
 ministère des Transports : 32, 105, 192
 Minneapolis : 15
 mission déléguée de bassin : 20, 32, 33
 modèle déterministe : 118
 modèle hydraulique : 181
 modèle probabiliste : 118
 modèles d'aide à la décision : 150
 modèles hydrologiques : 150
 module spécifique : 71-74, 95, 105
 module : 71-74, 95, 105
 Moles A. : 96, 153
 monde intelligent : 135, 153, 172, 196, 197, 201
 Monnier Y. : 9
 monographie du bassin Seine-Normandie : 74, 192, 193, 203, 207
 Montaigne : 200
 Montbard : 60, 194
 Montcornet : 57, 59
 Montesquieu : 196
 Montreuil : 118
 Montsauche : 59
 Montsouris : 59, 72, 117, 118, 125, 126, 127, 133-136, 138, 195
 Morvan : 4, 26, 59, 72, 193, 194, 203
 mosaïque d'images : 142, 145
 Moselle : 183
 moulinet, 181-183
 moyennes chevauchantes : voir moyennes mobiles : 51, 69
 moyennes de trente années consécutives : 67, 68, 73
 moyennes glissantes : voir moyennes mobiles : 51, 69, 91
 moyennes mobiles : 67, 69, 92
 Musgrave : 132
 Mustapha : 185, 186, 187, 188
- N**
- Nantes : 195
 nappe d'eau souterraine : 159
 nappe de Beauce : 159
 nappe de l'albien : 159
 nappes de la craie : 159
 NASA : 7, 206
 naturaliste : 29, 88, 94, 192, 195
 Nature : 5, 7, 55, 117, 120, 144, 151, 153, 183, 201, 206
 navette spatiale : 7
 neige : 61, 95, 96, 103, 129, 144
 Nil : 53, 150, 163
 Nilgun Bayraktar Harmancioglu : 150
 nitrates : 167, 198
 Noirrieu : 133
 normales : 31-60, 25
 normes : 47, 60, 71, 93, 102, 142, 152

Nouméa : 8, 10, 102

Nouvelle Calédonie : 8, 177

NSS (Natures Sciences et Sociétés) :
5, 6, 7, 8, 206

O

Obled C. : 144

observateur : 30, 31, 34, 36-43, 45,
47, 83, 87, 88, 104, 109, 126,
132, 177, 185, 186, 188, 200

observations climatologiques : 172,
192

observatoire de physique du
globe, :127, 192

observé : 26, 38, 39, 46, 78, 105, 110,
111, 119-121, 123, 126, 158, 166,
180, 187, 194, 200

occupation des sols : 182, 198, 200

océans : 93, 94, 153, 161, 162, 165,
166, 170, 200

Oise : 84, 86, 109, 110, 133, 179

Olivetti : 58

OMM : 47, 60, 69, 78, 101, 117, 128,
130, 195, 196, 206

ONU : 172

optimum pluviométrique : 25

orage : 86, 102, 109, 111, 112, 117,
118, 121, 132-134, 137, 160, 171,
177, 179

ordonnance de 1946 : 40, 192

Orgeval : 110

Origny-Sainte-Benoîte : 133, 179

Ornain : 110

Orne : 182, 183

ORSTOM : 18, 48, 78, 79, 87, 88,
104, 105, 109, 112, 113, 132,
199, 206

Ortega y Gasset J. : 95

oued : 177, 185, 186

Ouest de la France : 123

oxygène dissous : 179

P

Pacifique sud : 105

palais du Bardo : 125, 126

Pannecière : 179

paradigme : 144, 169, 184

parcelles expérimentales : 16, 104,
156, 158, 187

Pardé M. : 39, 40, 77, 78

Paris : 4, 34, 59, 64, 72, 73, 78, 84, 89,
96, 102, 117, 123, 125-127, 132,
133, 137, 141, 177, 179-183, 195

Paris Montsouris ; voir Montsouris :
59, 72, 117

Parlement : 17

Parshall : 158, 185

partiteur de débit : 156

Pascal : 4, 29

Pauhlus : 148

paysages agraires : 199

Pearson : 117

Pédelaborde P. : 21

pelle du déversoir : 187

pénurie énergétique : 198

Père Lachaise : 135

Perrault P. : 29

persistance : 58

Petit-Renaud : 91, 92

PFTB : 6, 8

Pharaons : 169

phases lunaires : 53, 164

physiologie des plantes : 150

physique des sols : 150

PIREN Seine : 199, 206

pixellisation : 143

pluies acides : 167

pluies exceptionnelles : 40, 110

pluies maximales probables (PMP) :
153

PLUVIO

pluviogramme : 35, 139

pluviographe à augets basculeurs : 35,
127, 128, 129

- pluviographe à siphon et flotteur : 126, 127, 128, 133, 134
 pluviographe : 21, 32, 40, 42, 126-129, 131, 133-136, 156, 158, 185
 pluviomètre enregistreur : 72, 143, 156
 pluviomètre représentatif (ou de référence) : 111, 112
 pluviomètre : 24, 27, 31, 32, 34, 37, 38, 47, 60, 61, 101, 102, 104, 109, 111-113, 125, 127, 129-131, 143, 144, 156, 171
 pluviométrie : 23, 24, 54, 69, 72, 85, 88, 89, 105, 110, 133, 134, 164, 167, 178, 192
 Poincaré : 132
 police des eaux : 17, 78, 106
 pollution : 17, 19, 53, 106, 126, 183, 184
 polygones de Thiessen : 24, 152
 Polynésie : 105, 106, 177, 191
 Polytechnique : 80
 Pompidou G. : 135, 179
 Pont d'Austerlitz : 72
 Port à l'Anglais : 181
 porte de Saint Cloud : 102
 potamologue : 39
 Pouilly-en-Auxois : 57, 59, 60, 69, 81
 pouvoir auto épurateur : 184
 précipitation maximale probable (PMP) : 117, 153, 207
 précipitation maximale quotidienne (record) : 117
 précipitation moyenne annuelle : 23, 105
 précipitations (atmosphériques) : 10, 61, 91, 99, 134, 142, 152, 153, 205
 précipitations occultes : 104
 prédétermination : 96
 prédéterminer une crue d'une fréquence donnée : 118
 premier semestre : 6
 pressions intersticielles : 115
 prévision de la ressource en eau : 41
 prévision météorologique : 118
 prise d'eau potable : 183
 prix Henri Milon d'hydrologie : 77, 147
 prix Nobel de la Paix : 194
 probabilisme : 61, 74
 probabilité (d'occurrence) : 80, 111
 processus stochastiques : 151, 166, 170
 produits polluants : 183, 184
 programme ARAMIS : 141
 programme Mélodi : 141
 propagation d'un débit : 9, 179, 182
 publication de données : 30
 Puisaye : 199
 Pyrénées : 40, 60
 Pyrénées Orientales : 40
- Q**
- qualité de l'eau de pluie : 167
- R**
- radar : 35, 78, 89, 130, 141-145, 205
 radars et précipitations : 142
radars et précipitations atmosphériques : 142
 raisonnement finalisant : 172, 197
 raisonnement par analogie : 181
 ras du globe : voir globe : 13, 75, 91-94, 97, 101, 152, 155, 164, 170, 198
 rayonnement solaire : 93, 96, 163, 164, 166, 170
réalité augmentée : 196, 197
 réchauffement climatique : 7, 9, 55, 73, 74, 92, 196, 197
 reconstitution d'une donnée manquante : 46

- régime des eaux : 90, 141, 198
 régime océanique : 194
 régime permanent : 180, 183
 région parisienne : 109, 118
 relation de cause à effet : 151
 relations pluies débits : 32, 35, 79, 86, 87, 110, 135, 152
 remembrement : 19, 199
 Réménieras G. : 77, 148
 rémunération des observateurs : 36
 Renou : 46, 192, 194
 Requiem de Mozart : 135
 réseau climatologique : 31
 réseau d'assainissement : 90, 179, 182
 réseau de mesure : 8, 171
 réseau hydrométéorologique : 30, 36
 réseau hydrométrique : 79, 205
 réseau officiel : 109, 111
 réseau piézométrique complémentaire : 34
 réseau pluviométrique complémentaire : voir RPC 27 : 6, 27, 31, 33, 36, 64, 86, 127, 199, 203
 résistivité : 183
 ressource en eau : 17, 41, 53, 74, 75, 110
 rétention : 122, 158, 160, 172, 187
 rétroaction positive : 94, 197
 réutilisation : 21, 83, 168
 Reyran : 115
 Rhin : 51, 128, 183
 Rhin-Meuse : 19, 51, 128
 rhodamine : 183, 184
 Rhône : 18, 24, 90
 Rhône-Méditerranée-Corse : 18, 19
 Rhue : 116
 Richer : 77
 robinet : 180
 Roche M. : 78, 105, 148
 Roche P.A. : 6, 7, 87, 88, 143
 Rodda J. : 78
 Rodier J. : 78, 88, 112
 Roissy-Charles-de-Gaulle : 143
 Rome : 195, 202
 Romilly-sur-Seine : 40, 193
 rosée : 104, 142
 Rosenberg : 25
 Rosnay de J. : 165
 rotations de la terre : 93
 Rougerie G. : 5, 9, 20, 103, 141, 177
 Rougerie les fils : 9
 Royaume-Uni : 78
 RPC : 31-38, 42, 43, 64, 65, 68, 86, 87, 104, 109, 112, 127, 131, 133, 207
 rue de Javel : 86
 rue de Lourmel : 102
 rue de Rivoli : 36
 rue de Ronchères : 199
 ruissellement : 5, 16, 20, 148, 149, 156, 157, 158, 163, 188
 runoffcurvenumber : 118, 153, 159
 rupture de barrage : 111
 rupture : voir saut: 47, 51
- S**
- Saint G. : 89
 Saint Bris : 26
 Salaün A. : 163
 San Anthony Falls : 15
 Saône : 26, 30, 65
 Saône et Loire : 26
 Saulieu : 60
 Saulx : 110
 saut : 47, 48, 51, 112
 scénarios catastrophes : 73
 SCET-COOP : 15, 207
 Schoeller : 78
 science fiction : 172
 sciences de l'imprécis : 96, 153
 sciences économiques : 153

- sciences hydrologiques : 8, 15, 113, 147, 153
sécheresse : 52, 53, 58, 65, 66, 72-75, 77, 170, 199
sécheresse de 1976 : 199
seconde guerre mondiale : 77, 80, 172, 202
Second Empire : 85, 132, 137, 179
second semestre : 6, 53, 69
section amont aval : 180
section mouillée (d'écoulement) : 182, 183
section pluviométrie de la SHF : 88, 133, 134, 167
Seine : 17, 20, 26, 29, 30, 31, 45, 49, 57, 60, 64, 73, 84-86, 89, 96, 109, 110, 112, 116, 138, 179, 180-184, 194, 199, 206
Seine-Normandie : 6, 8, 19, 20, 32, 66, 72, 81, 87, 112, 116, 159, 184
Seine Saint Denis : 84, 109, 110, 142, 143
série homogène : 51
séries de Fourier : 53, 92
Serra L. : 65
service de la navigation : 34, 85
SHF (Société Hydrotechnique de France) : 54, 77, 88-91, 110, 123, 133, 134, 142, 147, 167, 207
Shlikomanov : 161, 162, 164, 166
Sidi-bou-Baker : 21, 127
Sircoulon J. : 105
Slutski : 51
SNCF : 116
Société Des Nations : 172
société Précis Mécanique : 128
SODETEP : 127, 207
Sogny en l'Angle : 110
Soil Conservation Service (SCS) : 16, 118, 207
sondages atmosphériques : 192
sonde à ultrasons : 182
Sorbonne : 9, 80
sous estimation : 24, 110
sous le vent : 25, 26, 194
soutien d'étéage : 73, 84, 179
SPEPE : 18, 205, 207
SPOT : 141, 207
SRAE : 34, 37, 38, 74, 87, 198, 199, 207
stabilité du climat : 96
stabilité structurale des sols : 103
station de jaugeage : 26, 72, 158, 183
station de référence : 191
station météorologique : 36, 102
stationnarité : 55, 95
station officielle : voir station météorologique : 39, 40
stations à ultrasons : 183
Stendhal : 194
stochastique : 151, 166, 170
stockage dans l'atmosphère : 92, 93, 164
stockage et déstockage : 93, 164
Stretter & Phelps : 184
stubblemulch : 156
surface du globe : voir globe : 10, 93, 95, 164-166, 196, 200
surfaces irriguées : 89, 141, 163
- T**
- Tabuchi J- P. : 32
taches solaires : 52, 53
Tahiti : 191-193
Teisserenc de Bort : 192
télédétection : 89, 141
température de l'air : 107, 160, 191, 193, 195-197
temps de concentration : 16, 120, 132, 138, 148
temps de montée : 120, 185
temps de propagation : 180, 182
temps de réponse : 138
tendance : 51, 52, 74, 75, 92, 104, 120, 149, 164, 182, 195

Ténière-Buchot, PF. (voir PFTB) : 6
 terres émergées : voir continent : 6,
 10, 61, 66, 69, 93, 94, 96, 162,
 163, 165
 terres froides : 199
 terres humides : 199
 test du χ^2 : 58
 théorème central limite : 58, 59
 théorie du renouvellement : 86
 thermodynamique : 93, 96, 150, 170,
 196
 thermomètre : 194, 195, 198
 Thévenin J. : 33
 Thirriot C. : 8, 147
 Thornthwaite : 153
 Tien Duc : 84
 tirage au sort unique : 91
 Tixeront J. : 30, 33, 58, 60, 74, 193,
 194, 202, 203
 Torricelli : 29
 totaux pluviométriques annuels : 52,
 63, 75, 123, 169, 170, 171
 Toulouse : 83, 87
 transformée de la variable : 58
 transports solides : 147
 Trappes : 61, 128, 129, 142, 143
 travailleurs indépendants : 19, 42
 traversée de la pluie : 65, 93, 94, 138,
 145, 168, 169, 177
 Trégastel : 89
 trente (30) années consécutives : 68
 Treussart : 128
 Tricart J. : 20, 26
 Troyes : 179, 180-182
 Truyère : 78
 Tunis : 5, 10, 15, 17, 20, 22, 57, 78,
 86, 103, 112, 127, 131, 177, 185,
 187, 188, 202, 203, 205
 TU ou TUC, temps universel com-
 pensé : 34, 37, 38, 52, 207
 Turc : 107
 Turin : 24, 46

U

université de Besançon : 9, 15, 177,
 195
 université de Bordeaux : 78
 université de Colorado Springs : 80
 université de Grenoble : 129
 université de Montpellier : 6, 134
 université de Nancy : 57
 université de Paris : 89, 141
 université de Strasbourg : 20
 université libre d'Amsterdam : 161
 urbanisation : 132, 133
 USDA : 16, 117, 153, 207

V

Val d'Oise : 109, 110
 Valence : 24
 Valiron F. : 20, 22, 26, 33, 34, 54, 83,
 86, 87, 127, 202, 203
 vapeur d'eau : 25, 94, 95, 101, 160,
 172, 198
 Var : 115, 133, 179
 Varennes-en-Argonne : 133
 variabilité (des précipitations) : 23,
 52, 53, 55, 57, 61, 63, 67, 68, 71,
 91, 93, 113, 122, 123, 135, 156,
 165, 170
 variables explicatives : 58
 Vaussaire : 116
 végétation aquatique : 78, 183
 Ven Te Chow : 148
 Venturi : 185
 Vercors : 24
 verticales de mesure : 182
 Vézère : 78
 vidange décennale : 116
 Vière : 110
 Villers-en-Argonne : 133
 Villevieille A. : 89, 110
 vitesse d'écoulement : 181, 182, 184

Vitton : 128
Vituki : 30
volumes écoulés : 16, 72
volume total de la crue : 120
Voynet : 6
Vries de J.J. : 161, 164, 165

W

Walnut Gulch : 113
Weather Bureau : 117
Wishmeier : 15, 21, 127, 131
Woltman : 181
Wust : 93, 94, 162-164

X

Xynthia (tempête) 96

Y

Yalta Yalt'eau : 18
Yevjevich V. : 67, 79, 80, 81, 92, 147,
148, 150, 153
Yonne : 72, 84, 112, 137, 179
Yougoslavie : 80

Z

Zipf : 81
zone intertropicale : 103
zone saturée et non saturée : 96
zones bocagères : 182, 199
Zumstein J.F. : 51, 128

Table des matières

Prologue : de la mesure avant toute chose	5
Première partie – De la stabilité des totaux annuels de précipitations recueillies au ras du globe.....	13
Chapitre premier – Les débuts en hydro climatologie	15
Chapitre 2 – La cartographie des précipitations annuelles.....	23
Chapitre 3 – La fabrication des données quotidiennes : le pourquoi et le comment.....	29
Chapitre 4 – La constitution des chroniques	45
Chapitre 5 – Pourquoi traquer les sauts, les tendances et les cycles ?.....	51
Chapitre 6 – La variabilité des totaux annuels de précipitations	57
Chapitre 7 – Conséquences en cascade.....	63
Chapitre 8 – Regard sur la variabilité des moyennes de 30 années consécutives.....	67
Chapitre 9 – Impact de cette variabilité pluviométrique sur les écoulements	71
Chapitre 10 – Les débats à la SHF en 1967	77
Chapitre 11 – Un besoin double : l'accès aux données quotidiennes et l'échange sur les études réalisées	83
Chapitre 12 – Rebondissements dans l'affaire de la variabilité des totaux annuels des précipitations	91
Deuxième partie – Les précipitations atmosphériques et l'hydrologie de surface.....	99

La traversée de la pluie et l'hydro climatologie

Chapitre 13 – Regarder la pluie tomber	101
Chapitre 14 – L’excès d’écoulement, résultat inattendu de la barbarie du spécialisme	105
Chapitre 15 – La densité des pluviomètres à l’épreuve d’un orage	109
Chapitre 16 – La fréquence des précipitations quotidiennes extrêmes	115
Chapitre 17 – Enregistrer le déroulement de la pluie pour en mesurer l’intensité	125
Chapitre 18 – A quoi sert l’enregistrement ponctuel du déroulement de la pluie ?	131
Chapitre 19 – Le radar : l’approche combinée de la densité et de l’intensité	141
Chapitre 20 – Qu’est-ce que l’hydrologie ?	147
Chapitre 21 – Les bilans hydriques et hydrologiques, de la case lysimétrique au bassin versant	155
Chapitre 22 – Le bilan hydrique global, du continent au globe entier	161
Chapitre 23 – Les passagers de la dernière traversée	167
Chapitre 24 – Conclusion générale sur la traversée de la pluie	169
Troisième partie – Autres textes	175
Chapitre 25 – Présentation de ces autres textes	177
Chapitre 26 – La propagation d’un débit ajouté à l’étiage en cours	179
Chapitre 27 – Bouajila	185
Chapitre 28 – Epilogue pour nos gouvernants : le changement climatique encore et toujours	191
Souvenirs affectueux	202
Liste des sigles	205
Remerciements	209
Index	211
Tables des matières	227

Guy BÉDIOT



L'auteur, né en 1939, a obtenu son doctorat de géomorphologie dynamique à Besançon en 1966 sur l'érosion des sols due au ruissellement en Tunisie. Recruté pour faire l'étude climatologique du bassin Seine Normandie, il intégra l'agence financière, délaissant le CNRS. Il installa le réseau pluviométrique complémentaire, puis entreprit les études hydrologiques au droit de sites potentiels de barrages réservoirs dont il proposa la programmation en amont de Paris. En parallèle, la SHF lui confia l'animation de sa section pluviométrie. Il organisa plusieurs colloques et fit le bilan des actions de lutte contre la sécheresse de 1976 en France. La précision des mesures, tant hydrométriques que pluviométriques, fut toujours une de ses préoccupations. En 1986, il changea de métier et fut chargé de la réorganisation des banques de données de la qualité des eaux de Seine Normandie puis de l'ensemble des agences de l'eau. Il conçut le secrétariat d'administration nationale des données relatives à l'eau (SANDRE) et pilota le projet de réseau national de banques de données sur l'eau (RNDE).

Ce livre est le fruit de 30 années de vie professionnelle au service de l'hydro climatologie depuis le début des années 60, alors que s'accroissent les problèmes de pollution et par suite, ceux liés à l'accès à une ressource en eau suffisante et de qualité.

30 années passées à renforcer notre capacité à tirer des informations de mesures pluviométriques, ponctuelles dans l'espace, mais effectuées durablement sur des dizaines d'années, avec leurs défauts et lacunes métrologiques.

30 années passées à étudier la pluie au sens général des précipitations atmosphériques, un sujet pas toujours bien traité car revendiqué par plusieurs disciplines scientifiques qui s'ignorent entre elles.

Et pourtant, la pluie conditionne notre vie de tous les jours.

Le point de vue de l'hydrologue, d'abord confiné à son bassin versant, s'élargit peu à peu vers toutes sortes de bilans, hydriques et hydrologiques, sur des surfaces allant de la case lysimétrique à celle du globe tout entier.

L'examen de différents points de vue, de différents métiers et méthodes, permet de conclure d'abord qu'à l'échelle du globe, les précipitations sont bien égales à l'évaporation et qu'ensuite les variations constatées d'une année sur l'autre pourraient s'expliquer en partie par la combinaison et la différence de lieux de stockages et déstockages : dans le globe, principalement dans les océans pour la chaleur, et dans l'atmosphère pour l'eau.

L'auteur se pose ensuite des questions sur le réservoir hydrique atmosphérique, celui d'où provient la pluie et sur d'éventuelles incidences relatives à l'hypothèse du réchauffement climatique.

Le choix de la forme « souvenirs discursifs » permet une grande liberté d'expression à l'opposé de ce qu'il est convenu dans les colloques et revues scientifiques. Elle permet surtout de transgresser la règle des limites d'une discipline pour aller pincer dans les voisines, souvent de façon impertinente, pour alimenter la formulation d'autres problèmes comme ceux liés au changement climatique et se confronter aux résultats filtrant dans les media, notamment ceux du GIEC.

ISBN 979-1091089012



9 791091 089012



<http://www.editions-johanet.com>